

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА, АРХИТЕКТУРЫ  
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ  
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ

## Известия КГАСУ 2017 г., № 4 (42)

ББК 38  
И 33  
УДК 69

**Главный редактор:** д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ Р.К. Низамов  
**Зам. главного редактора:** д-р техн. наук, проф. Р.А. Садыков

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Мирсаяпов И.Т., д-р техн. наук, проф.;
Есаулов Г.В., д-р арх., проф., академик РААСН;	Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф., почетный член РААСН;
Ильичев В.А., д-р техн. наук, проф., первый вице-президент РААСН;	Сулейманов А.М., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ;
Каюмов Р.А., д-р физ.-мат. наук, проф.;	Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;	Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);	Хассан Абдалла, д-р наук (PhD), проф. (Великобритания);
Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);	Янотка И., канд. техн. наук, с.н.с. (Словакия).

### УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определяемый Высшей аттестационной комиссией (ВАК), рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25136 от 20 июля 2006 г.). Включен в общероссийский каталог ОАО Агентства «РОСПЕЧАТЬ», индекс издания – 36939.

### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, ком. 79  
Тел. (843) 510-46-39, факс (843) 238-37-71  
E-mail: [patent@kgasu.ru](mailto:patent@kgasu.ru) Сайт: <http://izvestija.kgasu.ru>

---

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION  
KAZAN STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND ENGINEERING  
MINISTRY OF CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING  
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN  
MINISTRY OF TRANSPORT AND ROADS  
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

## News of the KSUAE 2017, № 4 (42)

BBC 38  
I 33  
UDC 69

**Editor-in-Chief:** Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT Nizamov R.K.  
**Deputy Editors-in-Chief:** Dr. tech. sci., prof. Sadykov R.A.

### EDITORIAL BOARD:

Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;	Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the Academy of RAACS;	Mirsayapov I.T., Dr. tech. sci., prof.;
Ilichev V.A., Dr. tech. sci., prof., First Vice President of RAACS;	Stroganov V.F., Dr. chem. sci., prof., honorary m. of RAACS;
Kayumov R.A., Dr. phys-mat. sci., prof.;	Suleimanov A.M., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT;
	Khozin V.G., Dr. tech. sci., prof.;
	Iakovlev G.I., Dr. tech. sci., prof.

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of EAS, foreign member of RAACS (Israel);	Hassan Abdalla, PhD, prof. (Great Britain);
Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);	Janotka I., Cand. tech. sci., head of unit (Slovakia).

### THE FOUNDER AND THE PUBLISHER:

FSBEI of HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»

The journal is included in the index of leading reviewed scientific journals and editions, defined by the Higher Attestation Commission, and recommended for publication of basic scientific results of dissertations on scientific degree of the doctor and the candidate of sciences. The articles are reviewed. Reproduction without the permission of editors is prohibited; citing references to the journal are obligatory.

It is registered by Federal agency on surveillance of legislation observance in sphere of mass communications and cultural heritage protection (the certificate on registration PI № FS77-25136, dated July, 20<sup>th</sup>, 2006). It is included in the all-Russian catalogue of JSC «ROSPECHAT» Agency; subscription number 36939.

### EDITORIAL ADDRESS:

420043, Kazan, Zelenaya 1, office 79  
Tel. (843) 510-46-39, fax (843) 238-37-71  
E-mail: [patent@kgasu.ru](mailto:patent@kgasu.ru) Web-site: <http://izvestija.kgasu.ru>



К 55-летию юбилею Файзуллина И.Э.	7
<b>ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ</b>	
Гайворонская З.И., Айдарова Г.Н. Классификационные особенности водных компонентов и структур в формировании архитектурной среды	8
Зейферт М.Г. Особенности образования и развития архитектуры раннехристианских церквей	15
Киносьян Н.С. Творческое наследие архитектора И.Г. Гайнутдинова и его роль в общем процессе развития архитектуры СССР в 30-60-е годы XX века	23
Надырова Д.А. Многофункциональные досуговые комплексы Казани середины XIX-начала XX вв.	32
Надырова Х.Г. Общественные бани-хаммам в средневековых городах Волго-Камья: формирование традиции и особенности архитектуры	41
Попов А.О., Матвеев И.Ю., Бирюлева Д.К. Меншиков бастион Петропавловской крепости г. Санкт-Петербург. Фрагменты изначального строения	52
Фахрутдинова И.А., Ефимов Д.Д. Средовой подход в региональной архитектуре советского модернизма 1970-1980 гг. в проектировании Выставочного зала Союза Художников ТАССР в г. Казани, архитекторы: Г.А. Бакулин (руководитель авторского коллектива), Р.Х. Галеев, В.П. Мулюкин	59
Чебинев А.И., Чебинева Е.В. РАТН – «подземный город» Торонто	68
<b>АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ</b>	
Авксентьева Т.В., Волосатова С.А. Реализмы на все времена	77
Гиззятова Л.Р., Краснобаев И.В. Временная архитектура общественного назначения: предпосылки, история, классификация и потенциал современного развития	85
Зайнуллина А.М. Типология современных архитектурных решений рынков	95
Рачкова О.Г. Задачи проектирования современных «Центров подготовки космонавтов»	102
Самойленко А.А., Денисенко Е.В. Аналогии живых структур в архитектурном пространстве	109
Цокур А.В., Денисенко Е.В. Принципы поэтапного внедрения велосипедной инфраструктуры в городскую среду	117
<b>ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ</b>	
Исмагилова С.Х. Формирование природного каркаса в структуре крупного промышленного города	129
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ</b>	
Арленинов Д.К., Линьков Н.В. Предложения по методике испытаний для оценки ползучести древесины	136
Ахметзянов Ф.Х., Радайкин О.В., Ибрагимов Р.А. К эффекту «деформационного упрочнения» бетона при растяжении механической нагрузкой	142
Замалиев Ф.С. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок	150
Исаев А.В., Вахтель Р.Р., Закиров Р.А. Численные исследования напряженно-деформированного состояния стальной рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла	159
Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Красильников В.О., Тазюков Б.Ф. Разработка методики расчета элементов конструкции многоэтажного жилого здания на долговечность	167
Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Ахметзянов Р.И. Моделирование процесса деформирования и оценка долговечности армированной балки	174
Мирсаяпов Ил.Т., Фаттахова А.И. Техничко-экономическая оценка влияния повышения прочности и выносливости бетона за счет применения высокопрочного бетона на расход материалов в железобетонных каркасах по серии 1.020-1/83	182
Страхов Д.Е., Сахапова А.И. Применение объемных конечных элементов в реконструируемых зданиях архитектурного наследия	189
Удлер Е.М. Некоторые аспекты теневой терминологии	196
Хусаннов Д.М., Пеньковцев С.А., Хабибулина А.Г. Разработка фундаментов балластного типа для стоечных конструкций	204
<b>ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ</b>	
Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Особенности деформирования глинистых грунтов при повышающемся режимном нагружении	214
Мирсаяпов И.Т., Шараф Хани М.А. Прочность и деформации глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при блочных режимных циклических нагружениях	221
Сиразиев Л.Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтового основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя	228
<b>ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ</b>	
Багоутдинова А.Г., Вацагина Е.К., Золотоносов Я.Д. Математическое моделирование труб с винтовой поверхностью теплообмена	237

Варсегова Е.В., Ахмерова Д.Р. Исследование течения в каналах различных форм	245
Давыдов А.П., Валиуллин М.А. Методика расчета всасывающих воздухопроводов с присоединением расхода по пути (Метод коэффициентов расхода)	251
Зиганшин А.М., Гимадиева Г.А., Батрова К.Э. Потери давления и характеристики струи, выходящей через среднее боковое отверстие	257
<b>ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ</b>	
Бусарев А.В., Селюгин А.С., Каюмов Ф.Ф., Ибатуллин Л.Х. К вопросу определения качества дождевых стоков на примере г. Казани	266
Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Низамова А.Х. Подготовка технической воды для заводнения продуктивных нефтеносных горизонтов	273
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ</b>	
Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А., Потапова Л.И. Исследование взаимодействия компонентов комплексного модификатора методом ИК-спектроскопии	280
Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Щелконогова Я.В. Определение состава продуктов гидратации композиционного цементного камня с комплексной добавкой термоактивированной полиминеральной глины и известняка	289
Кашапов Р.Р., Красиникова Н.М., Хозин В.Г. Исследование эксплуатационных характеристик тяжелых цементных бетонов с полифункциональной добавкой	296
Лыгина Т.З., Лузин В.П., Корнилов А.В. Техногенные отходы нерудного сырья в производстве строительных материалов	303
Фомин А.Ю. Асфальтобетон для дорожных работ на основе низкомарочного щебня, усиленного серой	314
Хаматова А.Р., Яковлев Г.И., Грахов В.П., Хохряков О.В. Механоактивация быстротвердеющих композиций на основе электросталеплавильного шлака	321
Хохряков О.В., Хозин В.Г., Валиева А.И. Сухая органоминеральная добавка для устройства безусадочных промышленных полов	328
Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на температурный интервал работоспособности полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе	335
<b>ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА</b>	
Коклюгина Л.А., Коклюгин А.В. Выбор вариантов реконструкции малоэтажных жилых зданий с учетом требований инвестиционных строительных проектов	343
Мухаметрахимов Р.Х., Вахитов И.М. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера	350
Мухаметрахимов Р.Х., Панченко А.А. Изучение особенностей системы контроля качества при строительстве наружных сетей водоснабжения и канализации	360
Хузиахметов Р.А., Сахапов Р.Л., Земдыханов М.М., Андреева С.А. Расчет центра тяжести масс и угла устойчивости в поперечной плоскости сваебойного копра СП-49Д на базе трактора Т-10МБ	368
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ</b>	
Буланов П.Е., Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Строганов В.Ф. Оптимизация состава и исследование влияния комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на физико-технические свойства, укрепленных порландцементом, глинистых грунтов	376
Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Асадуллина А.Р., Сафин Д.Р. Влияние пластифицирующих добавок различной химической основы на физико-технические свойства глинистых грунтов, укрепленных порландцементом	384
Николаева Р.В., Логинова О.А. Оптимизации сети автомобильных дорог	392
<b>СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
Гумеров А.В., Гумеров В.Г. Расчет силы, возникающей при движении кругового цилиндра в плоскопараллельном потоке, содержащем вихревую нить методом присоединенных вихрей	400
Хамитов Т.К., Хасанов А.Р. Динамическое выпучивание цилиндрической оболочки при осевом ударе	407
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА</b>	
Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г., Потапова Л.И. Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждения мелкодисперсных частиц классов РМ <sub>10</sub> , РМ <sub>2,5</sub>	415
Лупанов А.П., Силкин В.В., Баяртогтох Дулмаа, Ильина О.Н. Обеспечение экологической безопасности при производстве асфальтобетонных смесей на АБЗ	424
Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»	432



# CONTENTS

To the 55 <sup>th</sup> anniversary of Fayzullin I.E.	7
<b>ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY, HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION</b>	
<b>Gayvoronskaya Z.I., Aidarova G.N.</b> Classification features of water components and structures in the formation of the architectural environment	8
<b>Zeyfert M.G.</b> Peculiarities of formation and development of the early Christian churches architecture	15
<b>Kinosyan N.S.</b> The creative heritage of the architect I.G. Gainutdinov and his role in the general development of the architecture of the USSR in the 30-60s of the XX <sup>th</sup> century	23
<b>Nadyrova D.A.</b> Multifunctional entertainment complexes of Kazan middle of the XIX-early XX centuries	32
<b>Nadyrova Kh.G.</b> Public baths-hammam in the medieval cities of Volga-Kama: the formation of traditions and peculiarity of the architecture	41
<b>Popov A.O., Matveev I.Y., Biryuleva D.K.</b> Menshikov's Bastion of the Peter and Paul fortress in St. Petersburg. Fragments of the original structure	52
<b>Fachrutdinova I.A., Efimov D.D.</b> The environmental approach in the regional architecture of the Soviet modernism of 1970-1980-ies, in the design of the Exhibition Hall of the Union of Artists of the TASSR in Kazan, the architects: G.A. Bakulin (head of the authors group), R.Kh. Galeev, V.P. Mulyukin	59
<b>Chebinev A.I., Chebinea E.V.</b> PATH – underground city of Toronto	68
<b>HOUSES ARCHITECTURE. THE CREATIVE CONCEPT OF ARCHITECTURAL ACTIVITIES</b>	
<b>Avksenteva T.V., Volosatova S.A.</b> Realism for all time	77
<b>Gizziatova L.R., Krasnobaev I.V.</b> Temporary public architecture: premises, history, classification and potential of modern development	85
<b>Zainullina A.M.</b> Typology of modern architectural solutions for markets	95
<b>Rachkova O.G.</b> The tasks of designing of modern «Cosmonaut training centers»	102
<b>Samoylenko A.A., Denisenko E.V.</b> The analogy of living structures in architectural space	109
<b>Tsokur A.V., Denisenko E.V.</b> The principles of the phased implementation of bicycle infrastructure in the urban environment	117
<b>URBAN DEVELOPMENT, RURAL SETTLEMENTS PLANNING</b>	
<b>Ismagilova S.Kh.</b> Formation of a natural framework in structure of the large industrial city	129
<b>BUILDING STRUCTURES, HOUSES</b>	
<b>Arleninov D.K., Linkov N.V.</b> Methods of experimental research to value for the creep of the wood	136
<b>Ahmetzjanov F.Kh., Radaikin O.V., Ibragimov R.A.</b> To the effect of «strain hardening» concrete under tensile mechanical load	142
<b>Zamaliyev F.S.</b> Calculation and experimental studies of composite steel-concrete beams	150
<b>Isaev A.V., Vahtel R.R., Zakirov R.A.</b> Numerical study of stress-strain state of frame with variable section and eave node splitting	159
<b>Kayumov R.A., Muhamedova I.Z., Krasilnikov V.O., Tazyukov B.F.</b> Development of the design procedure for structural elements of multi-storey residential building for durability	167
<b>Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R., Ahmetzyanov R.I.</b> Modeling of the process of deformation and evaluation of the life of a reinforced beam	174
<b>Mirsayapov I.T., Fattakhova A.I.</b> Technical and economic assessment of the concrete's strength and endurance increasing effect due to the high-strength concrete using for the materials consumption in reinforced concrete frames according to the series 1.020-1/83	182
<b>Strakhov D.E., Sakhapova A.I.</b> Application of volume finite elements in the reconstructed buildings of architectural heritage	189
<b>Udler E.M.</b> Some aspects of tent terminology	196
<b>Khusainov D.M., Penkovtsev S.A., Khabibulina A.G.</b> Development of the foundations of the ballast type for rack-mounted construction	204
<b>FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES</b>	
<b>Mirsayapov I.T., Koroleva I.V.</b> Features of clay soils deformation with increasing regime loading	214
<b>Mirsayapov I.T., Sharaf Hani M.A.</b> Strength and deformation of clay soils in the conditions of the triaxial compression under block regime cyclic loading	221
<b>Siraziev L.F.</b> Experimental studies of the stress-strain state of the three-layer soil base under short-term plate-bearing test and the presence of the water saturated layer	228
<b>HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING</b>	
<b>Bagoutdinova A.G., Vachagina E.K., Zolotonosov Ya.D.</b> Mathematical modeling of pipes with a helical heat exchange surface	237
<b>Varsegova E.V., Akhmerova D.R.</b> Research of the flow in channels of different forms	245
<b>Davydov A.P., Valiullin M.A.</b> Method of calculation of suction air pipes with flow connection along the way (Method of flow coefficients)	251
<b>Ziganshin A.M., Gimadieva G.A., Batrova K.E.</b> The pressure losses and the characteristics of the jet flowing through the middle lateral outlet	257

<b>WATER SUPPLY, SEWERAGE, WATER CONSERVATION CONSTRUCTION</b>	
<b>Busarev A.V., Selyugin A.S., Kayumov F.F., Ibatullin L.H.</b> The determination of the quality of rainwater runoff on the example of Kazan	266
<b>Busarev A.V., Sheshegova I.G., Nizamova A.Kh.</b> Preparation of technical water for flooding productive of oil-bearing horizons	273
<b>BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS</b>	
<b>Bogdanov R.R., Ibragimov R.A., Potapova L.I.</b> Investigation of the interaction of a complex modifier for self-compacting concrete and its components using the IR-spectroscopy method	280
<b>Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Shchelkonogova Ya.V.</b> Hydration products composition of blended cement stone with a complex additive calcined polymineral clay and limestone	289
<b>Kashapov R.R., Krasnikova N.M., Khozin V.G.</b> Research of exploitative properties of cement-based heavy concretes with polyfunctional additive	296
<b>Lygina T.Z., Luzin V.P., Kornilov A.V.</b> Technogenic waste of non-metallic raw materials in the building materials production	303
<b>Fomin A.Yu.</b> Asphaltic concrete for road works based on low-quality crushed stone, reinforced with sulfur	314
<b>Khamatova A.R., Yakovlev G.L., Grakhov V.P., Khohryakov O.V.</b> Mechanoactivation of quick-setting compositions based on electric steelmaking slag	321
<b>Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Valieva A.I.</b> Dry organic mineral mix for the production of non-shrinking industrial floors	328
<b>Shehkovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A.</b> The influence of single-walled carbon nanotubes in the temperature range of efficiency of polymer-bitumen binders and asphalt concretes on their basis	335
<b>CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND ORGANIZATION</b>	
<b>Kokliugina L.A., Kokliugin A.V.</b> The selection of options for reconstruction of low-rise residential buildings, considering the requirements of investment construction projects	343
<b>Mukhametrakhimov R.Kh., Vakhitov I.M.</b> Additive technology of erection of buildings and structures using building 3D-printer	350
<b>Mukhametrakhimov R.Kh., Panchenko A.A.</b> Features of the quality control system for the construction of outdoor water supply and sewerage networks	360
<b>Khuziakhmetov R.A., Sakhapov R.L., Zemdikhanov M.M., Andreeva S.A.</b> Calculation of the center of gravity of the masses and the stability angle in the transverse plane of the pile-driving copra SP-49D on the basis of the tractor T-10MB	368
<b>ROADS, SUBWAYS, AIRPORTS, BRIDGES AND TUNNELS DESIGN AND CONSTRUCTION</b>	
<b>Bulanov P.E., Vdovin E.A., Mavliev L.F., Stroganov V.F.</b> Optimization of composition and investigation of the effect of complex hydrophobic-plasticizing additive on physico-technical properties, reinforced with Portland cement, clay soils	376
<b>Bulanov P.E., Mavliev L.F., Vdovin E.A., Stroganov V.F., Asadullina A.R., Safin D.R.</b> Effect of water-reducing agents with various chemical bases on the physical and technical properties of clay soils reinforced by Portland cement	384
<b>Nikolaev R.V., Loginova O.A.</b> Optimization of the road network	392
<b>CONSTRUCTION MECHANICS</b>	
<b>Gumerov A.V., Gumerov V.G.</b> Calculation of the force arising when a circular cylinder moves in a plane-parallel flow containing a vortex filament by the method of associated vortices	400
<b>Khamitov T.K., Khasanov A.R.</b> Dynamic buckling of cylindrical shell under axial impact	407
<b>ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND MUNICIPAL ECONOMY</b>	
<b>Zamaliyeva A.T., Ziganshin M.G., Potapova L.I.</b> The analysis of efficiency of use of a cyclonic filtration for sedimentation of fine particles	415
<b>Lupanov A.P., Silkin V.V., Bayartogtokh Dulmaa, Iilina O.N.</b> Ensuring the environmental safety during production of asphalt concrete mixtures at the plant	424
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	432



**ФАЙЗУЛЛИНУ ИРЕКУ ЭНВАРОВИЧУ –  
55 ЛЕТ!**

**8 декабря исполняется 55 лет  
министру строительства, архитектуры  
и жилищно-коммунального хозяйства  
Республики Татарстан  
Файзуллину Иреку Энваровичу**

И.Э. Файзуллин родился в 1962 году в Казани.

В 1985 году окончил Казанский инженерно-строительный институт (КИСИ) по специальности «Промышленное и гражданское строительство». Трудовую деятельность начал инженером кафедры металлических конструкций и испытаний сооружений КИСИ (1985-1989). В 1989-1993 гг. – главный инженер, директор ПСО «Татстройпроект». 1993-1995 гг. – председатель правления АО «Татстройпроект». 1995-1997 гг. – председатель правления ЗАО «Казстройдекор». 1997-2002 гг. – первый заместитель начальника объединения «Татавтодор». 2002-2005 гг. – генеральный директор ГУП «Государственная головная территориальная проектно-изыскательская научно-производственная фирма «Татинвестгражданпроект».

С 2005-2010 гг. – заместитель министра строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Республики Татарстан, генеральный директор ГУП «Татинвестгражданпроект».

С 24 ноября 2010 года по настоящее время – министр строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства РТ.

Заслуженный строитель Республики Татарстан, Почетный строитель России. Награжден государственными и ведомственными наградами.

И.Э. Файзуллин – председатель Попечительского совета КГАСУ, председатель Координационного совета научно-образовательного кластера КГАСУ. Он многие годы возглавляет в университете Государственную аттестационную комиссию по защите выпускных квалификационных работ, обращая особое внимание на дипломные проекты прикладного характера, в которых студенты университета решают актуальные задачи строительной отрасли. В течение многих лет Ирек Энварович вкладывает много сил и энергии во взаимодействие образования, науки и производства, содействуя налаживанию долгосрочных и перспективных отношений своего родного вуза с предприятиями архитектурно-строительной отрасли.

**Уважаемый ИРЕК ЭНВАРОВИЧ!**

**Ректорат и коллектив Казанского государственного архитектурно-строительного университета поздравляют Вас с прекрасной датой – 55-летием!**

Юбилей – это замечательный повод для коллег, друзей и близких, чтобы выразить искренние пожелания доброго здоровья, успехов в начинаниях, покорения новых вершин, счастья и благополучия!

Потрясающая энергия, удивительные человеческие качества, высокий профессионализм снискали Вам всеобщее уважение и признательность.

Мы гордимся Вами как достойным и талантливым выпускником КИСИ, верным и преданным другом, сильным и мудрым руководителем, интеллигентным и отзывчивым человеком. Благодарим Вас за постоянную поддержку родного университета – мы всегда чувствуем Ваше надежное дружеское плечо.

Пусть и в дальнейшем Вас окружает любовь близких, внимание коллег и друзей, а жизнь будет наполнена новыми свершениями и радостными событиями!

Ректор КГАСУ,  
член-корр. АН Республики Татарстан,  
доктор технических наук, профессор

**Р.К. Низамов**



УДК 728

Гайворонская З.И. – аспирант

E-mail: [zarini@list.ru](mailto:zarini@list.ru)

Айдарова Г.Н. – доктор архитектуры, профессор

E-mail: [aidagalnik@mail.ru](mailto:aidagalnik@mail.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Классификационные особенности водных компонентов и структур в формировании архитектурной среды

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Статья посвящена выявлению опыта формирования архитектурно-градостроительных объектов, взаимосвязанных с водными структурами.

*Результаты.* Выявлены акваморфологические особенности городских пространств новейшего времени. На основе анализа научных исследований и практического опыта рассмотрена классификация архитектурных объектов, взаимодействующих с водой: приводный объект, водосодержащий объект, подводный объект, водоструктурированный объект, надводный объект, плавучий объект, водно-озелененный объект. Выявлены градообразующие, экологические, климаторегулирующие, композиционно-пространственные, формообразующие, декоративные, ресурсосберегающие свойства воды, используемые в архитектуре и градостроительстве. Представлена таблица влияния воды на типы архитектурно-градостроительных объектов: приводный объект, надводный объект, подводный объект, плавучий объект, водоструктурированный объект, водосодержащий объект, водноозелененный объект. Выявлены основные подходы в создании объектов аква-архитектуры.

*Выводы.* В настоящее время формируется особый вид зодчества, инструментом которого являются природные компоненты, в частности, вода. Широкий спектр композиционных приемов аква-архитектуры открывает доступ к уникальным решениям, радикально меняя представление о возможностях архитектурного формообразования. Вода в архитектуре включает широкий арсенал средств гуманизации среды жизнедеятельности.

**Ключевые слова:** акваморфология, архитектура и вода, водные компоненты и структуры, аква-архитектура, свойства воды в архитектуре.

Одну из новейших тенденций нашего времени представляет формирование архитектуры с участием воды, как композиционного и смыслового акцентов, широкое использование воды в организации городских пространств, в экстерьерах общественных зданий. В разное время архитекторы повсеместно разрабатывали архитектурные решения объектов городской среды, в формообразовании которых вода играла значимую роль, как композиционный и смысловой акцент. Данным разработкам положили начало концепции Клода-Никола Леду, в XX веке развитие идеи было продолжено в работах Ричарда Бакминстера Фуллера, Кензо Танге, Кисё Курокавы, Кионори Кикутате, Вольфа Хилбертса. В этом направлении работают: Жан Нувель Винсент Калебо, Коэн Олтиус, Александр Асадов, архитектурное бюро Becker Architekten, Джеймс Ло и др.

В России благоустройство прибрежных зон является актуальной задачей. В Татарстане по инициативе минэкологии РТ разрабатываются концепции реновации прибрежных территорий с целью сделать общедоступными для отдыха уникальные природные зоны. В Казани реализован проект благоустройства набережной реки Казанка, состоялся международный конкурс на разработку концепции новых рекреационных зон на берегах озера Кабан, предпринимаются меры по очистке водоемов, формируется богатая инфраструктура набережных и пляжей [1]. Планируются преобразования прибрежных зон в Адмиралтейской и Новотатарской слободах, решаются вопросы благоустройства берегов речки Ноксы.



В настоящее время классификационные особенности водных компонентов и структур в вопросах формирования городской среды требуют дополнительных научных обоснований. Использование физических и морфологических свойств воды, активное внедрение воды в структуру городских пространств и зданий носит не редко интуитивный характер. Выявленные В.А. Нефёдовым формы взаимодействия архитектуры и воды (контакт с водным зеркалом, водная оболочка, водный фрагмент интерьера) создают предпосылки для углубления и расширения темы в данной области [2]. Рассмотренное Поляковой А.Б. влияние физических свойств воды и ее агрегатных состояний на архитектурное формообразование позволяет по-новому взглянуть на использование воды в организации архитектурного пространства [3]. Под термином «водные компоненты», в контексте данного исследования, понимаются воды гидросферы, а также искусственно созданные водные объекты: пруды, фонтаны, аквариумы, бассейны, каналы, арыки, водные горки, каскады и др. Водные структуры – это совокупность водных компонентов, обусловленная их физическими свойствами и агрегатным состоянием. Под акваморфологией можно понимать формирование архитектурной среды и архитектурных объектов с использованием тех или иных физические свойства воды.

Вода издревле являлась важнейшим градообразующим фактором. На основе анализа исторически сформировавшихся на воде поселений выявлены основные типы организации среды жизнедеятельности: островной, насыпной, понтонный, свайный. Планировочная структура – радиально-кольцевая, линейная; застройка – компактная или рассредоточенная. Ярким примером древнего поселения на воде является островная Венеция – культурный и туристический центр мирового значения, где гармонично сочетаются разнообразные виды использования водных компонентов (морское побережье, каналы). Вода – неотъемлемая часть художественного образа Венеции. Опасность затопления города ставит вопросы экстремального воздействия воды и необходимость их решения. Широко распространенные явления сезонных подтоплений городов и поселений, а также опасения, связанные с климатическими изменениями актуализируют проблему новых подходов к организации среды жизнедеятельности с использованием водных компонентов.

В историческом аспекте важно отметить, что в процессе использования водных ресурсов доминирующая функция объектов взаимодействующих с водными структурами менялась: коммуникация, фортификация, торгово-ремесленная и промышленная функция. Промышленное развитие крупнейших городов в 19-20 веках заложили проблемы в формировании водных рекреаций, отрезав городскую среду от естественных водоемов железнодорожными путями, причалами, дамбами, промышленно-складскими зонами, ограничив доступность к воде редкими выходами к набережным и пляжам [4]. В 30-40 гг. XX века развитие морских и речных контейнерных перевозок еще более способствовало ограничению доступа к воде как к рекреации – вода потеряла сакральный смысл. Водные компоненты рассматривались исключительно с утилитарной точки зрения. Во второй половине XX века преодоление сложившегося утилитарного отношения к воде явилось актуальной задачей.

В России пик портового строительства пришелся на вторую половину двадцатого столетия, преимущественно в послевоенный период. К 1960 году насчитывалось 400 причалов, протяженность которых составила 60 км [5]. В последние десятилетия проблемы экологизации среды жизнедеятельности включали разработку вопросов организации прибрежных зон. Казань обладает богатыми водными ресурсами: многочисленные озера, реки и речки, по мере разрастания города, становились частью городского пространства. В XIX веке сезонные разливы рек Волги и Казанки превращали улицы нижней части города в водные каналы, по которым передвигались на лодках. Цепь красивых озер – Нижний, Средний и Дальний Кабан на протяжении столетий являлась источником питьевой воды, водной рекреацией, сакральным ландшафтным объектом, вокруг которого сложилось множество исторических мифов и преданий. На рубеже XIX-XX веков на берегах Кабана возникли промышленные предприятия, пристани, складские зоны. Производственные выбросы привели к экологическому кризису. Потребовались специальные мероприятия по воссозданию экосистемы озера. Чтобы вернуть городу столь важный объект природы требуется разработка проектов прибрежных территорий, насыщение архитектурной среды

общественными рекреациями и объектами. Современный европейский опыт показывает новые возможности береговой архитектуры: создание рекреаций, зон отдыха, формирование системы пешеходных коммуникаций, раскрытие к воде жилых комплексов, интеграция воды в общественные городские пространства [6]. Комплексный анализ теоретических исследований и проектного опыта позволил выделить свойства воды, используемые в архитектуре и градостроительстве (рис. 1-3).



Рис. 1. Функции воды в архитектуре



Рис. 2. Влияния свойств воды на типы архитектурно-градостроительных объектов, взаимодействующих с водой (иллюстративный материал (фото), критически выявлен и заимствован из общедоступных ресурсов интернета, не содержащих указаний на авторов этих материалов и каких-либо ограничений для их заимствования)

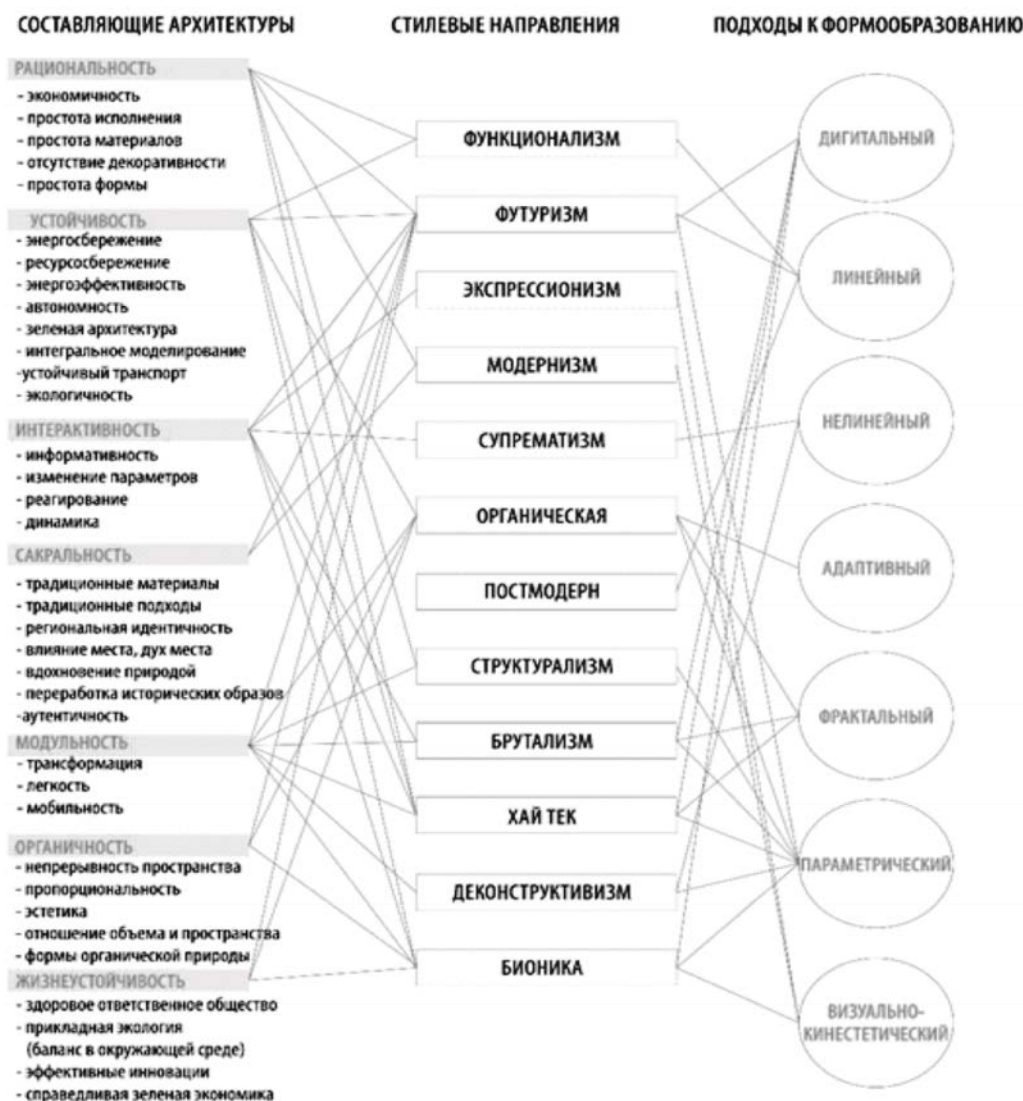


Рис. 3. Подходы к формообразованию аква-архитектуры

### Градообразующие свойства

Планировочные структуры городов на водных артериях приобретают орбитальный характер. Сначала, вокруг центрального ядра возникает ближняя орбита, а затем, последовательно, образуются дальние орбиты [7]. Тенденцию аквацентрического развития можно заметить на примере Казани, Москвы, Волгограда, Тбилиси, Сан-Франциско, Лондона, Парижа и многих других.

### Климаторегулирующие свойства воды

При отсутствии естественных водных пространств их создают искусственно – бассейны, арыки, оазисы, фонтаны, декоративные пруды, что позволяет улучшить качество среды жизнедеятельности, повысить экологические характеристики местности. Наличие водных ресурсов помогает регулировать уровень влажности воздуха, создавать благоприятные условия для формирования и возрождения флоры и фауны [8].

### Экологические свойства

В планировке и застройке местности учитывается месторасположение естественных водоемов. Водные структуры используются для формирования рекреационных зон, водно-зеленых систем, выполняющих функцию природно-экологического каркаса, сохраняя баланс флоры и фауны на местности.

### **Композиционно-пространственные свойства**

Исключительное свойство воды ее отражающая способность. Отражение архитектурного объекта в воде – сильное композиционное средство выразительности, участвующее в формировании панорамы архитектурного ансамбля. Зачастую такие панорамы становятся брендом архитектурного объекта и даже города. Водные каналы формируют разнообразные перспективы и визуальные оси, ведущие к композиционным доминантам – смотровым площадкам, мостам, зданиям. Выделяют различные особенности применения физических свойств воды в архитектурно-градостроительном проектировании, а именно: статичность и динамичность; отражение, изменение восприятия в зависимости от условий освещения (блики, мерцание, декоративное подсвечивание и т.п.); пластические возможности воды (текучесть, способность принятия заданной формы); звучание воды (журчание, падение капель, грохот падающей воды и т.п.); цветовые оттенки воды; экологические и климаторегулирующие свойства воды. Различают значимость водного устройства в архитектурной композиции: с доминирующим значением элементов воды; с подчиненным значением водных устройств, уравновешенной ролью воды, других ландшафтных элементов. При этом формы взаимодействия с водой могут включать различные варианты: объект в непосредственной близости от воды или объект у воды, нависание объекта над водой, касание объекта воды, перекидывание через водное пространство, расположение объекта на воде, под водой, использование воды в структуре архитектурного объекта [9].

### **Формообразующие свойства**

Вода обуславливает форму архитектурного объекта, с которым взаимодействует напрямую или косвенно. Прототипом для многих архитектурных объектов стала вода, ее физика в статичном и динамичном состоянии, ее агрегатное состояние, светопроницающие способности. Наиболее распространенный прием в акваморфологии архитектурных объектов это имитация волны, кристалла, льда, водной глади, пузыря и т.д. На объектном уровне для создания определенных композиционных эффектов архитекторы используют колебания – волны, капли, брызги, пузыри, воронки, струи и круги на воде. Такие приемы прослеживаются в проектах А.А. Асадова, Рене Ван Зуук, Antti Lovag, Orlando De Urrutia и др. Вода в твердом агрегатном состоянии представляется в виде льда, снега, кристалла, айсберга в проектах Herzog & de Meuron's, Захи Хадид, Майкла Ли Чин, Даниэля Либескинда и других. Источником вдохновения для архитекторов служит газообразное состояние воды – пар. В проекте павильона для швейцарской выставки Экспо 2002 The Blur Building арх. студия Diller + Scofidio архитекторы использовали 31400 форсунок для распыления воды под высоким давлением для достижения эффекта тумана [10]. Выявлены подходы к формообразованию «аква-архитектуры»: дигитальный, линейный, нелинейный, адаптивный, фрактальный, параметрический, визуально-кинестетический.

**Декоративные свойства воды** используются повсеместно в устройстве фонтанов, каскадных водопадов, бассейнов, декоративных прудов и являются одним из основных приемов в ландшафтной архитектуре и благоустройстве. Использование воды в интерьерах, экстерьерах, вертикальном озеленении, а также применение новейших технологий в использовании воды в сложных агрегатных состояниях открывает новые возможности формообразования.

### **Ресурсосберегающие и энергосберегающие свойства**

Альтернативные источники энергии, в частности гидроэнергетика становятся все более актуальными. Сжигание нефти и угля приводит к большим расходам, запасы этих ресурсов конечны. В гидроэнергетике отсутствуют вредные выбросы, что положительно сказывается на экологии. Кроме того, активно внедряются системы очистки «серых» стоков для повторного использования воды в качестве для смыва унитазов, мойки автомобилей, мойки тротуаров, полива зеленых насаждений, сбор дождевой воды. Такие системы в последние годы получили широкое распространение [11, 12].

### Заключение

В настоящее время вода участвует на всех архитектурно-градостроительных уровнях формирования среды жизнедеятельности: набережные, прибрежные городские территории, архитектурные объекты различного назначения, включающие широкий арсенал возможностей, особенностей, приемов и средств гуманизации среды. Формирование гармоничной структуры городского пространства и улучшение среды жизнедеятельности возможно посредством внедрения в архитектуру водных компонентов и принципов аква-архитектуры. Выявленные типы архитектурно-градостроительных объектов, взаимодействующих с водой: приводный объект, надводный объект, подводный объект, плавучий объект, водо-структурированный объект, водосодержащий объект, водноозелененный объект, могут найти использование в архитектурно-градостроительной практике Казани и Татарстана. Предложенная классификация свойств водных компонентов и структур в формировании городской среды: градообразующие, климаторегулирующие, экологические, композиционно-пространственные, формообразующие, декоративные, ресурсосберегающие расширяют практические подходы к формированию городской среды.

### Список библиографических ссылок

1. Нефедов В. А. Городской ландшафтный дизайн. СПб. : Любавич, 2012. 320 с.
2. Полякова А. Б. Акваморфологические аспекты в архитектуре // Архитектон: известия вузов. 2010. № 30.
3. Официальный сайт венецианской комунны. URL: <http://www.comune.venezia.it/it> (дата обращения: 26.10.17).
4. Раппопорт А. Архитектура и вода. Башня и лабиринт // Блог А. Раппопорта. URL: [http://papardes.blogspot.ru/2009/08/blog-post\\_8864.html](http://papardes.blogspot.ru/2009/08/blog-post_8864.html) (дата обращения: 26.05.17).
5. Понятовский В. В. Морские порты и транспорт (эволюция). М. : МГАВТ, 2006. 429 с.
6. Нефедов В. А. Береговая архитектура и дизайн среды у воды // Зеленый город. URL: <http://green-city.su/beregovaya-arhitektura-i-dizajn-sredy-u-vody/> (дата обращения: 25.05.17).
7. Косицкий Я. В. Архитектурно-планировочное развитие городов. М. : Архитектура-С, 2005. 645 с.
8. Лаутман В. Удивительные исчезающие следы Индии. URL: <https://www.archdaily.com/878527/the-astonishing-vanishing-stepwells-of-india> (дата обращения: 25.05.17).
9. Ариф Алави Мухамед. Вода и архитектура: смысловая и композиционная связь // Архитектура и строительные науки. 2014. № 1-2 (18-19). URL: <https://ais.by/article/voda-i-arhitektura-smyslovaya-i-kompozicionnaya-svyaz> (дата обращения 20.10.17).
10. Шумская О. Р. Формообразующие возможности воды в дизайне средовых объектов // Мир науки, культуры, образования. 2014. № 4 (47). С. 284–286.
11. Денисенко Е. В. Биологические критерии и биоподходы в архитектуре XXI века // Вестник ВолГАСУ. Серия «Строительство и архитектура» / Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. 2013. № 33 (52). С. 173–178.
12. MVRDV, KM3: Excursions on capacities. Barcelona : Actar, 2005. P. 1413.

**Gayvoronskaya Z.I.** – post-graduate student

E-mail: [zarini@list.ru](mailto:zarini@list.ru)

**Aidarova G.N.** – doctor of architecture, professor

E-mail: [aidagalnik@mail.ru](mailto:aidagalnik@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## Classification features of water components and structures in the formation of the architectural environment

### Abstract

*Problem statement.* The article is devoted to revealing the experience of formation of architectural and town-planning objects interconnected with water structures.

*Results.* Aquamorphological features of urban spaces of modern times are revealed. Based on the analysis of scientific research and practical experience, a classification of architectural objects interacting with water is suggested: drive object, water-containing object, underwater object, water-structured object, surface object, floating object, water-green plant. The city-forming, ecological, climate-regulating, composition-spatial, form-forming, decorative, resource-saving properties of water used in architecture and town planning are revealed, a table of water effects on the types of architectural and town-planning objects is presented: a drive object, a surface object, an underwater object, a floating object, a water-structured object, a water-containing object, a water-green plant. The main approaches to the creation of aqua-architecture objects are revealed.

*Conclusions.* At the present time a special kind of architecture is being formed, the instrument of which is natural components, in particular water. A wide range of compositional techniques of aqua architecture opens access to unique solutions, radically changing the idea of the possibilities of architectural shaping. Water in architecture includes a wide arsenal of means of humanizing the environment of life.

**Keywords:** aquamorphology, architecture and water, water components and structures, aqua-architecture, water properties in architecture.

### References

1. Nefedov V. A. Urban landscape design. SPb. : Lubavitch, 2012. 320 p.
2. Polyakova A. B. Aquamorphological aspects in architecture // *Arkhitekton: izvestiya vuzov*. 2010. № 30.
3. Official website of the Venetian commune. URL: <http://www.comune.venezia.it/it> (reference date: 26.10.17).
4. Rappoport A. Architecture and water. Tower and labyrinth // Blog of A. Rappoport. URL: [http://papardes.blogspot.ru/2009/08/blog-post\\_8864.html](http://papardes.blogspot.ru/2009/08/blog-post_8864.html) (reference date: 26.05.17).
5. Ponyatovsky V. V. Seaports and Transport (Evolution). M. : MSAWT, 2006. 429 p.
6. Nefedov V. A. Coastal architecture and design of the water environment // *Green city*. URL: <http://green-city.su/beregovaya-arhitektura-i-dizajn-sredy-u-vody/> (reference date: 25.05.17).
7. Kositsky Ya. V. Architectural and planning development of cities. M. : Arkhitektura-S, 2005. 645 p.
8. Lautman V. The Amazing endangered traces of India. URL: <https://www.archdaily.com/878527/the-astonishing-vanishing-stepwells-of-india> (reference date: 25.05.17).
9. Arif Alavi Muhamed. Water and architecture: the semantic and compositional connection // *Arkhitektura i stroitel'nyye nauki*. 2014. № 1-2 (18-19). URL: <https://ais.by/article/voda-i-arhitektura-smyslovaya-i-kompozicionnaya-svyaz> (reference date: 20.10.17).
10. Shumskaya O. Form-forming capabilities of water in the design of environmental objects // *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2014. № 4 (47). С. 284–286.
11. Denisenko E. V. Biological criteria and biological approaches in the architecture of the XXIst century // *Vestnik VolGASU. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura» / Volgograd state university of architecture and civil engineering*. 2013. № 33 (52). P. 173–178.
12. MVRDV, KM3: Excursions on capacities. Barcelona : Actar, 2005. P. 1413.

УДК 72.032/033

**Зейферт М.Г.** – кандидат архитектуры, доцент

E-mail: [zeyfertm@mail.ru](mailto:zeyfertm@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

## **Особенности образования и развития архитектуры раннехристианских церквей**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить особенности формирования и развития архитектуры раннехристианских церквей. Основные результаты исследования состоят в следующем:

*Результаты.* 1. С зарождением христианства радикально меняется функциональное назначение культовых сооружений. Во времена гонений проведение религиозных обрядов происходило в сооружениях, предназначенных для других целей. Особенности объемно-планировочного решения данных сооружений: синагог, жилых домов, крипт и капелл катакомб, базилик в большей или меньшей степени повлияли на формирование архитектуры нового типа культового здания.

2. Несмотря на отказ от используемых ранее конструкций: распорных сводов, массивных стен, многие элементы античности нашли свое продолжение в структуре церковных зданий: апсиды, перекрытые конхой, двор, окруженный портиками и др.

3. Практически во всех рассмотренных церквях используются споллии – части разрушенных античных зданий, а форма зданий зависит от сохранившихся фундаментов, расположенной под ними ранней застройки.

4. Кроме основных типов церковных зданий – продольного и центрального, выделяется третий тип – комбинированный, более сложный, основанный на сочетании линейных и центральных объемно-планировочных элементов, этот прием характерен для крупных античных ансамблей – терм, дворцов.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры заключается в подтверждении преемственности при появлении зданий нового типа и формировании архитектурных стилей.

**Ключевые слова:** история архитектуры, античная архитектура, раннехристианские церкви, преемственность, архитектурные элементы.

Появление и развитие новых типов зданий является одним из важнейших разделов теории архитектуры. Тем более если этот тип здания со временем становится объектом мирового значения и получает, в различных интерпретациях, распространение в большинстве стран.

Целью данного исследования являются особенности образования и развития архитектуры раннехристианских церквей.

На появление и распространение христианства, а со временем христианской церкви, оказали влияние социально-политические, религиозные, территориальные факторы.

В эпоху римской империи происходят изменения в религиозной жизни. Расширяется пантеон общепризнанных римских богов. Рим прирастает провинциями, народами, а, следовательно, и культурами греческого и восточного происхождения. Возводятся величественные храмы, посвященные не только почитаемым богам, но и обожествленным даже при жизни римским императорам. Несмотря на обширный пантеон богов и посвященных им храмов, значительная часть населения Рима и римских провинций – рабы были вне какой-либо религии, не имели домашнего алтаря [1, с. 49], а обожествление императоров не признавали многие жители Рима. Древняя VIII-VII вв. до н. э. монотеистическая религия – иудаизм была религией одной нации – иудеев, отличалась сложными ритуальными обрядами и системой догматов, поэтому не могла стать заменой язычеству.

Жители римской империи утрачивали веру в своих богов, а множество появившихся монотеистических религиозных направлений и сект провинций:

поклонение Кибеле пришедшее из Фригии, Исиде из Египта, митраизм из Персии в силу своих особенностей не получили значительного распространения.

Христианская религия, зарождалась в иудаистских сектах Палестины, Кумранской общине, а развитие получила на обширных территориях римской империи. С 6 г. н. э. Иудея и Галилея, где родился и жил Христос, являлись римской провинцией, находились под управлением тетрарха Ирода Антипы. До этого с 332 по 63 гг. до н. э. данные территории были в подчинении Греции, происходила эллинизация иудаизма, а впоследствии, христианства. Греция дала зарождающейся религии духовную культуру, философию отрицающую политеизм и язык «койне» понятный многим народам римских провинций. На этом языке христиане написали Новый завет.

Обширные территории римской империи, объединенные единым законом, армией и развитой системой бетонных дорог стали благодатной средой для распространения христианских идей.

С зарождением христианства изменилось функциональное назначение культовых сооружений. Ранние христиане не думали о церкви как о здании, доме для почитаемого божества доступного только для священнослужителей. Церковь была символом общности людей объединенных верой в спасение, а место собрания общины в первое время было не так важно. «Спасение возможно лишь в лоне Церкви, которая есть «тело Христово»: она объединяет верующих в одно мистическое тело с «обожженной», лишенной греха человеческой природой Христа» [2, с. 161].

До признания христианства в 313 г. равноправной со всеми другими вероисповеданиями религией, во времена гонений, ритуалы проводились в жилых домах и катакомбах, одним из мест проповедей стали синагоги. Именно в это время формировались функциональные, объемно-планировочные требования к новому типу здания – церкви.

Десятилетия совершения обрядов в сооружениях изначально предназначенных для других целей не могли не повлиять на формирование архитектурной среды церкви. «Иудаизм стал предтечей христианства и на некоторое время предоставил убежище этой нарождающейся религии» [3]. Сходство церкви с синагогой заключается в наличии большого светлого и вместительного пространства с сидячими местами для верующих вдоль продольных стен, расположения алтаря или платформы со священными предметами в обоих случаях с восточной стороны, а главного входа в здание со стороны запада. Тем ни менее требование ориентации алтаря на восток, при возведении церквей, во многих случаях не выполнялось. Часто при строительстве использовались античные сооружения, либо частично сохранившиеся конструкции зданий – фундаменты, стены и др. Например, церковь Сан Лоренцо ин Миранда включает конструкции храма Антонина и Фаустины, а при строительстве церкви Санти Козма э Дамиано использованы два здания имперской эпохи: храм божественного Ромула и библиотека мира.

Также для собрания общин использовались жилые дома, так называемые *tituli* – «дома собраний». К концу IV в. только в Риме было 25 подобных зданий. Один из таких домов для собраний находился под церковью Сан Клементе. «Церковь св. Клементе – это палимпсест, несколько разновременных пластов, которые накладываются друг на друга так, что ни один полностью не уничтожает предыдущего» [4, с. 269]. Архитектурный комплекс состоит из наземной церкви, подземной базилики, под которой, в свою очередь, располагался целый лабиринт древнеримских жилищ, одно из которых – дом Тита Флавия Клементе предназначался для собрания первых христиан. Планировочное решение раннехристианской церкви во многом идентично структуре патрицианского жилого дома, сложившегося в IV в. до н. э. Очевидно это связано с десятилетиями использования, и соответственно приспособления, дома для проведения тайных ритуалов. Атрий или перистиль с крытой галереей по периметру, расширенное пространство с двумя симметрично расположенными – алами, схожими с трансептом церкви, приподнятый на несколько ступеней таблинум – подобно санктуарию в церкви, использовался для совершения культовых обрядов и трапез. В структуре дома выделялись помещения для обучения детей и место для крещения – баптистерий. Античные росписи, украшавшие жилой дом, превращенный в церковь, заменялись фресками и мозаиками христианского содержания.



Самым мрачным местом проведения христианских обрядов были многокилометровые катакомбы, подземные кладбища с погребальными нишами – кубиклами и местом тайных литургий – криптами и капеллами. В многочисленных катакомбах вдоль Аппиевой дороги похоронены первые христиане, пострадавшие за веру. После отмены гонений и официального признания христианства государственной религией в 313 г. обычай проведение ритуалов на местах связанных с мученической смертью за веру сохранился. Церковь Санта Прасседе, как и многие другие, воздвигнута на месте, где сестры Пракседа и Пуденциана погребли останки двух тысяч мучеников христиан, сброшенных в колодезь, за что и сами были замучены. Над колодезем в V в. был воздвигнут мартириум, а затем в IX в. базилика.

Существует также предположение связи архитектуры христианской церкви с императорскими форумами, прежде всего, Трояна, данная гипотеза основана на необычном сходстве их планировочного решения. Вход на форум Трояна и святилище находятся напротив друг друга, продольные колоннады окружающие симметричную площадь разделяют ее на главное центральное и боковые пространства, а базилика Ульпия своими очертаниями и расположением напоминает поперечный неф – трансепт. «Перенос образа бога с императора на монотеистического христианского бога может, очевидно, объясняться и адаптацией христианским церковным строительством императорской архитектуры» [5, с. 43].

Одним из основных светских зданий императорского Рима были базилики или базиликальные залы дворцов. Объемно-планировочное решение этих зданий наилучшим образом отвечало требованиям христианского церковного обряда. Подобно античным базиликалам христианская церковь имела вытянутое от входа до санктуария помещение, разделенное рядами колонн или пилонов на три, или пять, нефов. Более широкий средний неф возвышался над боковыми нефами и освещался через окна, прорезанные в верхней части стены, санктуарий, расположенный в глубине, заменил место судьи или зрителя рынка.

На создание античных зданий, городов часто оказывали влияние правители, облик церковей также связан с именем первого императора христианина Константина. По указу Константина крупные церкви должны были иметь трансепт, двухскатную стропильную крышу, опирающуюся на кирпичные стены и подвесной деревянный кессонированный потолок. Упрощение конструкций, отказ от распорных сводов, а, следовательно, массивных стен, был вынужденной мерой, связанной с ухудшением экономического положением империи, ростом христианских общин и необходимостью возведения большого количества церковных зданий. Потребность качественных строительных материалов стало одной из причин вторичного использования архитектурных элементов разрушающихся античных зданий – споллий. Например, при строительстве церкви Санта Мария ин Трастевере, использованы 22 колонны терм Каракаллы [6, 142-143]. Планировка, сохранившиеся конструкции древних сооружений определяли размеры и конфигурацию церковных зданий построенных на их основе. Например, церковь Сан Джорджо ин Велабро имеет неправильную трапециевидную форму, так как опирается на части строений II-III вв., а к левой стене здания примыкает сохранившаяся часть сооружения известного как Арка серебряников. Все колонны церкви представляют собой споллии утраченных античных зданий. С левой стороны трехнефной церкви колонны коринфские с гладкими стволами, справа две колонны коринфские с каннелюрами, остальные ионические. Все колонны, отличающиеся по цвету, материалу и длине стволов. На дощатом потолке нарисованы кессоны и звезды, стропила боковых нефов открыты. Оконные проемы закрыты трансеннами.

Меньшее распространение получил центрический тип церковных зданий. Аналогом в античной архитектуре служили круглые помещения терм и в большей степени мавзолей. Примером таких зданий в Риме являются церкви Санто Стефано Ротондо и Санта Констанца. Последнее здание было построено в IV в. как усыпальница для дочерей императора Константина – Констанции и Елены, в последствии мавзолеем был преобразован в баптистерий, а затем в церковь. Сдвоенные колонны отделяют центральную повышенную, увенчанную куполом часть здания от амбулакра покрытого бочарным сводом. Наряду с круглыми и квадратными культовыми зданиями встречаются здания восьмиугольные, например баптистерий Сан Джованни ин Фонте. Сооружения аналогичной формы также часто использовались античными архитекторами. Марцеллум

Лептис Магна, относящийся к 9-8 гг. до н.э., состоял из окруженного портиками прямоугольного двора, в центре которого располагались два круглых бассейна без покрытия, окруженных стеной с прорезанными арками. Снаружи бассейны были обрамлены крытыми восьмиугольными галереями.

С изменением религии, а, следовательно, и функционального назначения церкви, меняются принципы размещения новых культовых зданий в структуре города. Места для возведения языческих храмов выбирали с учетом статуса, значимости богов, способов жертвоприношений, культовые здания занимали лучшие городские территории, центры форумов. Большое количество богов, плотная городская застройка, часто вынуждало строить храмы вплотную друг к другу, например, четыре храма священного района Ларго Арджентина. В отличие от храмов церкви строились для общины определенного населенного пункта или городского района, располагались рассредоточено на лучших местах. Размеры зданий зависели от значимости церкви, соизмерялись с количеством верующих. Новая религия повлияла на образ жизни горожан, христианские принципы препятствовали светским развлечениям, посещению зрелищных сооружений. Арены античных стадионов и амфитеатров, долгое время служившие местами казни единомышленников, приходили в запустение и разрушались.

В исследовании проведен анализ объемно-планировочных решений и структурных элементов раннехристианских церквей построенных на территории Рима и римских провинций. В таблице приведены наиболее характерные типы рассмотренных зданий.

Таблица

**Особенности раннехристианских церквей на территории Рима и римской империи**

Страна, город	Наименование церкви	Время возведения, реконструкции	Особенности планировочного и конструктивного решения
1	2	3	4
<b>Продольный (линейный) тип сооружений</b>			
Рим	Базилика Апостола Петра	324-349 гг.	Сохранилась подземная часть базилики с захоронениями
Рим	Церковь Сан Клементе	XII в. IV в II-III вв. I в.	Многоуровневый архитектурный комплекс Наземная церковь Базилика на 4 м ниже уровня земли Митреум на 10 м ниже уровня земли Инсулы
Рим	Базилика Санта Прасседе	V в	Первоначально мавзолей на месте захоронения мучеников христиан
Византий, Константинополь, Стамбул	Базилика Санта София	Начало строительства в 326 г., освящена в 360 г.	Сохранилась: часть стены атриума, раскоп портика, скефофилакий (диаметр 11 м) используется как сосудохранилище, сполы
Византий, Константинополь, Стамбул	Базилика Санта Ирина	330 г.	42,2 на 36,7 м, уникальный синтрон (поднимающиеся амфитеатром места для епископов)
Северная Эфиопия	Церковь монастыря Дэбре-Дамо	Основана в VI в. в эпоху Аксумского царства	Прямоугольное в плане здание. Стены состоят из чередующихся слоев камня и дерева
Греция, Салоники	Церковь Св. Дмитрия Солунского	Мавзолей, 412 г. реконструкция 634 г.	43,58 на 33 м, 4-х скатная крыша, церковь трехнефная, после реконструкции пятинефная, сполы
Германия, Трир (с I в до н. э. Августа Треверорум, с III в. Треверис)	Кафедральный собор и Либфрауэнкирхе ранее двойная базилика	На месте дворца Елены, 324-326 гг.	Двойная базилика с двумя атриумами, 105 на 135 м.
Территория Болгарии, Месемврия	Церковь «Старая митрополия»	Основана в VI в.	25,5 на 20,2 м, три нефа, ширина среднего 9,3 м, пилоны 1,55 на 0,4 м, арки, деревянное покрытие

Продолжение таблицы

Центрический тип сооружений			
Рим	Церковь, ранее мавзолеей Санта Констанца	IV в	Круглый план, купол в центре, амбулакр перекрыт бочарным сводом
Рим	Церковь Санто Стефано Ротондо	468-483 гг.	До реконструкции план в виде греческого равноконечного креста, три концентрических нефа
Рим	Баптистерий Сан Джованни ин Фонте	310-е гг.	Восьмиугольный в плане зал, двухъярусная колоннада в центре
Милан	Церковь Сан Лоренцо Маджоре	355-372 гг.	Квадратная в плане форма с 4 угловыми башнями, между ними двухъярусные экседры
Равенна	Церковь Сан Витале	522-547 гг.	Ортогональный в плане зал, купол в центре, 7 экседр между центральной частью и двухъярусным амбулакром.
Комбинированный тип сооружений, архитектурных комплексов			
Иерусалим	Церковь Гроба Господня	Начало строительства в 326 г.	Сочетание ротонды с обходной 2-х этажной галереей и пятинефной базилики
Сирия, Алеппо (Халев)	Монастырь Калат Семан, церковь Св. Симеона-Столпника	460-490 гг.	Сочетание восьмиугольной формы диаметром 30 м и 4-х продольных базилик
Вифлеем	Церковь Рождества	IV-VI вв.	До реконструкции октогон и пятинефная базилика

Для раннехристианских церквей характерно ясное распределение пространства, четкое планировочное решение. Кроме основных типов зданий продольного, получившего наибольшее распространение, и центрического, можно выделить третий тип – комбинированный, более сложный, основанный на сочетании линейных и центрических планировочных элементов зданий. Примером такого типа зданий является церковь Гроба Господня в Иерусалиме. Архитектурный комплекс, вытянутый с запада на восток, состоит из ротонды с повышенной центральной частью и двухъярусной обходной галереей, пятинефной базилики, двора расположенного между этими зданиями и атрия с восточной стороны. Другим примером сложной композиции является церковь Св. Симеона Столпника в Сирии. Полуразрушенный в настоящее время комплекс состоял из четырех продольных базилик, сгруппированных вокруг центрального объема ортогональной формы, шириной 30 и высотой 40 м. Подобное сочетание объемов с переменной высотой и различной конфигурацией в плане, свойственен многим светским зданиям античности. Аналогичный прием архитектурной композиции мы видим в Золотом доме Нерона, построенного на четыре века раньше церкви Св. Симеона (рис. 1).

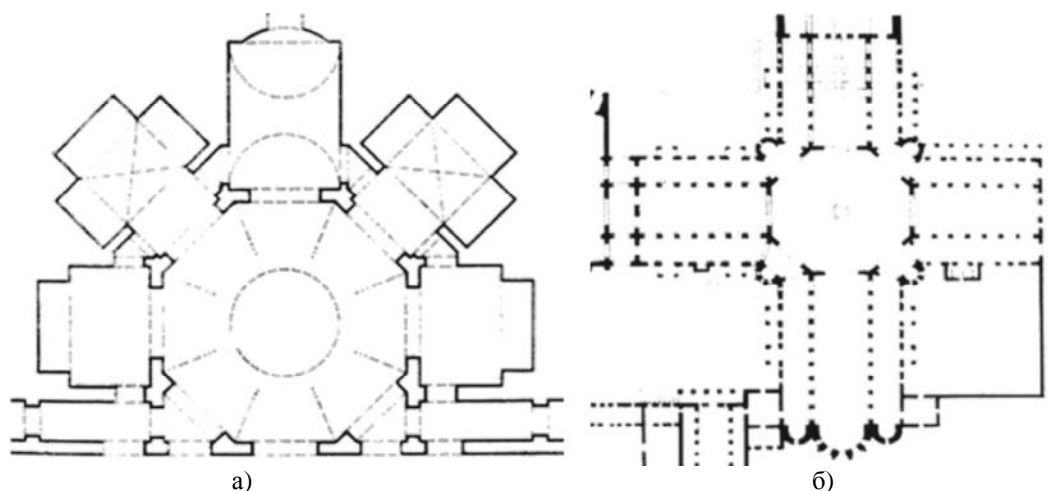


Рис. 1. Преемственность в архитектурной композиции античных и раннехристианских зданий:  
а) Золотой дом Нерона, 64 г.; б) Сирия, церковь Св. Симеона-Столпника, 460-490 гг.

Один из многочисленных залов дворца – октогон со стороной 13,5 м, образованный V-образными в плане столбами. Зал перекрыт восьмичастным сводом, переходящим в купол с опайоном. Распор купола погашался примыкающими к октогону прямоугольными, крестообразными и треугольными в плане помещениями перекрытыми сводам [7, 626].

Приемы сложного композиционного построения архитектурных ансамблей античности – терм, дворцов, использовались в дальнейшем при создании многих зданий, в том числе и культовых.

Излюбленным элементом древнеримских архитекторов были экседры, апсиды, эдикулы и ниши. Ниши украшали, как фасады, так и интерьеры зданий различного назначения, в том числе и храмы, в частности Пантеон. Ниши и эдикулы античных зданий, украшенные пилястрами и скульптурой, помимо эстетической функции, имели и конструктивное назначение, позволяя облегчить стены, сосредоточить нагрузки в пилонах. Полукруглые, прямоугольные, многоугольные в плане ниши имели плоское, цилиндрическое или полусферическое покрытие. Две соприкасающиеся, кессонированные апсиды разделяли линейное пространство языческого храма Венеры и Ромы. В апсидах размещали самые ценные предметы, в данном случае – статуи богов. Ниши использовали в кубикулах и криптах катакомб, маририумах. Апсиды стали одним из важнейших элементов христианских культовых зданий. Апсидами, чаще всего перекрытыми конхой, заканчивался главный неф церкви, а иногда и боковые. В некоторых случаях, например в церкви Св. Дмитрия в Салониках, центральный неф заканчивался полукруглой апсидой, а боковые прямоугольными. В римской церкви Санти Кватро Коронати все три нефа завершает единая большая апсида [8, с. 15]. Часто форма апсиды в интерьере и снаружи не совпадала (рис. 2,б). До реконструкции, в церкви Санта Мария ин Космедин три апсиды в толще стены не выходили на фасад. Есть примеры, когда апсидами завершался трансепт.

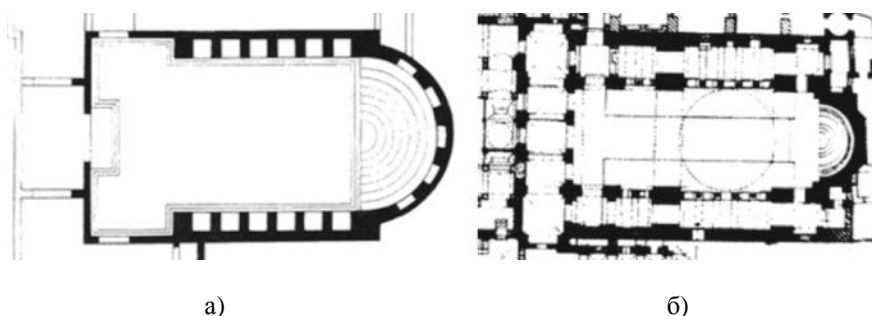


Рис. 2. Амфитеатр в апсидах античного здания и раннехристианской церкви:  
а) зал-аудитория виллы Мecenата, конец эпохи Республики;  
б) церковь Св. Ирины в Константинополе, 330 г.

Интересно, что не все элементы, заимствованные из античности, прижились в архитектуре церквей. В апсиде прямоугольного зала-аудитории, построенной в конце эпохи Республики, виллы Мecenата, амфитеатром поднимались семь полукруглых ступеней для зрителей [9, с. 138]. Из-за небольшого радиуса амфитеатра наблюдать представления видимо было неудобно. Подобный архитектурный элемент использован три с лишним века спустя в церкви Св. Ирины в Константинополе. В апсиде церкви, где в 381 г. происходил второй Вселенский собор, расположен синтрон – поднимающиеся амфитеатром сидения для епископов. Подобный ярусный синтрон присутствует в иконографии Вселенских соборов [10, с. 161]. Однако в дальнейшем, для совершения литургий, этот элемент оказался не нужен.

В эпоху античного Рима существовал закон о погребениях исключительно за городской чертой. Вдоль Консульских дорог стали появляться мавзолеи, колумбарии и саркофаги в катакомбах, а позднее христианские церкви. В церковь Сан Себастьяно, ранее называвшейся базиликой Апостолорум, в 258 г. временно поместили мощи апостолов Петра и Павла. Позднее мощи были перезахоронены в главных христианских базиликах. Казни пострадавших за веру христиан происходили в черте города и хоронили

погибших стали в местах гибели. В структуре церковных зданий, возведенных в память о христианах мучениках, появились места для захоронений – крипты и конфессии. Нижний придел церкви – конфессии размещался под главным алтарем. А конфессии базилики Санта Мария Маджоре создано для хранения священного предмета – яслей младенца Христа. Обычай совершать захоронения значимых для религии людей в церковных зданиях стал одной из особенностей христианской архитектуры.

«Человечество с каждым днем все более осознает общечеловеческую ценность памятников, рассматривает их как общее наследие и перед лицом будущих поколений признает совместную ответственность за его сохранность» [11, с. 199]. Каждая, сохранившая свой первоначальный облик, раннехристианская церковь поражает своей трогательной простотой и индивидуальностью. Интерьеры, не перегруженные декоративными украшениями, включают фрагменты античных зданий, древние, в некоторых случаях частично сохранившиеся, фрески и мозаики. Несмотря на новое функциональное назначение, использование новых конструкций в основе христианского церковного строительства заложена античная архитектура.

Значимость полученных результатов для архитектуры заключается в подтверждении преемственности при появлении зданий нового типа и формировании архитектурных стилей.

### Список библиографических ссылок

1. Штаерман Е. М. Кризис античной культуры. М. : Наука, 1975. 183 с.
2. Радугин А. А. Культурология. М. : Центр, 2003. 304 с.
3. Эрл Е. Кернс. Дорогами христианства. Раздел 1. Распространение христианства до 100 года. URL: <http://www.reformed.org.ua/2/296/3/Cairns/> (дата обращения: 23.10.2017).
4. Сонькин В. В. Здесь был Рим. Современные прогулки по древнему городу / Виктор Сонькин. М. : Изд-во АСТ: Corpus, 2016. 608 с.
5. Кох Вильфрид. Энциклопедия архитектурных стилей. Классический труд по европейскому зодчеству от античности до современности. М. : ЗАО БММ, 2008. 528 с.
6. Зейферт М. Г. Практика инкорпорирования и слияния элементов зданий различных эпох в памятниках архитектуры Рима // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (31). С. 11–17.
7. Маркузон В. Ф., Михайлов Б. П. Всеобщая история архитектуры. В 12 томах. Т. 2. Архитектура Античного мира. М. : Стройиздат, 1973. 711 с.
8. Lia Varelli The monumental complex of Santi Quattro Coronati in Rome. Roma: Viella s.r.l., 2009. 96 p.
9. Софья Пескарин. Рим. М. : БММ АО, 2001. 168 с.
10. Иванов С. Прогулки по Стамбулу в поисках Константинополя. М. : АСТ: Corpus, 2016. 688 с.
11. Надырова Х. Г. Хартии ИКОМОС и охранно-реставрационная деятельность в республике Татарстан: сб. ст. V Международной научно-практической конференции «Культурное наследие в XXI веке: сохранение, использование, популяризация» / КГАСУ, Казань, 2017. С. 198–203.

**Zeyfert M.G.** – candidate of the architecture, associate professor

E-mail: [zeyfertm@mail.ru](mailto:zeyfertm@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Peculiarities of formation and development of the early Christian churches' architecture

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the study was to reveal the peculiarities of formation and development of the architecture of early Christian churches. The main results of the study are as follows.

*Results.* 1. With the birth of Christianity the functionality of religious buildings has been radically changed. In times of persecution the conduct of religious rites occurred in structures designed for other purposes. Features of space-planning decisions of such structures as synagogues, houses, crypts and chapels of the catacombs, basilicas, to a greater or lesser extent influenced the formation of a new type of architecture of religious buildings.

2. Despite the rejection of previously used structures such as spacer arches and thick walls, many items of antiquity found its continuation in the structure of Church buildings: the apse, covered by conch, a courtyard surrounded by porticos etc.

3. Almost in all observed churches spolia are used as part of the destroyed ancient building, and form of buildings depends on the surviving foundations, which are located underneath the early development.

4. In addition to the basic types of church buildings – longitudinal and centric, stands the third type – the combined one, more complex, based on a combination of linear and centric space-planning elements; this technique is typical for large antique ensembles – terms, palaces.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the architecture is the confirmation of continuity in the emergence of a new type of buildings and the formation of architectural styles.

**Keywords:** history of architecture, ancient architecture, early Christian churches, the succession of architectural elements.

### References

1. Sterman E. M. The crisis of ancient culture. M. : Nauka, 1975. 183 p.
2. Radugin A. A. Culturology M. : Center, 2003. 304 p.
3. Earl E. Cairns. By the way of Christianity. Section 1. Distribution of Christianity up to year 100: <http://www.reformed.org.ua/2/296/3/Cairns/> (reference date: 23.10.2017).
4. Sonkin V. V. Here was Rome. Modern walks around the ancient city/Victor Sonkin. M. : Publishing House AST: Corpus, 2016. 608 p.
5. Koch Wilfried. Encyclopedia of architectural styles. Classical work on European architecture from antiquity to modern times. M. : ZAO BMM, 2008. 528 p.
6. Zeyfert M. G. Practice of incorporation and merging elements from buildings of different epochs in the monuments of Rome // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 1 (31). P. 11–17.
7. Marcuson V. F., Mikhailov B. P. General history of architecture. In 12 volumes. Vol. 2. The architecture of the Ancient world. M. : Stroizdat, 1973. 711 p.
8. Lia Barelli The monumental complex of Santi Quattro Coronati in Rome. Roma: Viella s.r.l., 2009. 96 p.
9. Pescarin Sophia. Rome. M. : BMM AO, 2001. 168 p.
10. Ivanov S. Walking around Istanbul in search of Constantinople / Sergei Ivanov. M. : Publishing House AST: Corpus, 2016. 688 p.
11. Nadyrova K. G. The charters of icomos and conservation and restoration activities in the Republic of Tatarstan: Sat. Art. V International scientific and practical conference «Cultural heritage in the XXI century: preservation, use, popularization» / KGASU, Kazan, 2017. P. 198–203.

УДК 72.035.5

**Киносьян Н.С.** – старший преподаватель

E-mail: [kinosa@mail.ru](mailto:kinosa@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **Творческое наследие архитектора И.Г. Гайнутдинова и его роль в общем процессе развития архитектуры СССР в 30-60-е годы XX века**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы является проведение специального исследования, посвященного изучению творческой деятельности архитектора И.Г. Гайнутдинова (анализ реализованных и нереализованных архитектурных объектов, выполненных И.Г. Гайнутдиновым лично или в соавторстве с другими архитекторами; анализ научных трудов и печатных работ И.Г. Гайнутдинова; выявление периодизации творчества и эволюции стилевых предпочтений архитектора).

*Результаты.* Составлен полный перечень реализованных и нереализованных проектов архитектора; научных трудов и печатных работ И.Г. Гайнутдинова. Выявлена периодизация проектной и научной деятельности и описан каждый творческий период архитектора. Определена роль И.Г. Гайнутдинова в общем процессе развития архитектуры СССР в 30-60-е годы XX века. Введены в научный оборот архивные материалы.

*Выводы.* Выявлены основные заслуги архитектора И.Г. Гайнутдинова:

1. Исследование народных традиций в зодчестве, внедрение прогрессивных сторон в творческую практику и подготовка ученых по проблематике национально-регионального своеобразия на уровне всесоюзного масштаба.

2. Изучение керамики в архитектуре и поднятие художественного качества строительства страны путем введения керамических материалов на фасады зданий.

3. Разработка жилых домов новой конструкции, давших большой экономический эффект в период индустриализации в СССР.

**Ключевые слова:** архитектор И.Г. Гайнутдинов, национально-региональные традиции, проектная и научная деятельность, периодизация, творческое наследие.

### **Введение**

Изучение творческого наследия архитектора И.Г. Гайнутдинова необходимо для полноты историко-теоретического осмысления архитектуры Татарстана. В настоящее время идет процесс осознания значимости произведений архитектуры 30-60-х годов, когда в современной архитектурной практике мы все чаще сталкиваемся с тенденциями глобализации и потери национально-региональной идентичности. В последнее время, в условиях колоссального развития Казани и получения права официально именоваться «Третьей столицей России» непреходящую актуальность имеют вопросы, связанные с проблемой отношения к наследию и необходимостью создания научной базы для формирования современной архитектуры Республики Татарстан, обладающей чертами культурной идентичности [1].

### **Основная часть**

Имя архитектора И.Г. Гайнутдинова (1908-1977 гг.) упоминается в литературных источниках как родоначальника научного изучения архитектурного наследия Татарстана [2]. Изучение закономерностей архитектурного мышления на примере деятельности выдающихся региональных архитекторов позволяет получить новые знания творческого процесса с учетом роли личности в развитии региональной архитектуры [3]. В архиве «Редких книг и рукописей» в научной библиотеке имени Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета (архивный фонд № 20) [4] имеются характеристики И.Г. Гайнутдинова, которые давали видные ученые и архитекторы, его современники: академик архитектуры В.Н. Семенов, главный архитектор г. Казани С.С. Копец, директор Московского архитектурного института А.Г. Казиятко, заведующий кафедрой архитектуры

КИИКС профессор Крестин и др. Имеются также характеристики, данные правлениями Союзов архитекторов из разных регионов страны, а также документ о почетном выделении И.Г. Гайнутдинова правлением ССА СССР в качестве своего представителя в комиссию к декаде татарского искусства в Москве (3.04.1941). Известно, что указом Президиума Верховного Совета ТАССР (от 29.06.1945) за выдающиеся заслуги в области искусства, в связи с 25-летием образования Татарской автономной Советской Социалистической Республики архитектору И.Г. Гайнутдинову присвоено почетное звание Заслуженного деятеля искусств Татарской АССР; указом Президиума Верховного Совета Северо-Осетинской АССР (от 11.01.1955) в связи с успешным завершением строительства памятника основоположнику осетинской литературы Коста Левановичу Хетагурову в г. Орджоникидзе архитектору И.Г. Гайнутдинову присвоено почетное звание Заслуженного деятеля искусств Северо-Осетинской АССР; указом Президиума Верховного Совета Башкирской АССР (от 17.10.1967) за большие заслуги в создании монументального памятника национальному герою башкирского народа Салавату Юлаеву архитектору И.Г. Гайнутдинову присвоено почетное звание Заслуженного деятеля искусств Башкирской АССР. Все эти документы подтверждают значимость и уникальность творчества архитектора и выделяют его среди архитекторов современников.

Исследование проектного материала И.Г. Гайнутдинова автором статьи началось в 2010 году [5]. В настоящее время проектный материал архитектора составил 66 наименований. (38 натуральных объектов, включая памятники и монументальные панно, и 28 неосуществленных проектов). Установлено, что натурные объекты архитектора представляют собой 9 наименований общественных сооружений: школа при СК-4 (1933-1934 гг., Казань), клуб работников меховой промышленности (1933-1934 гг., Казань), КХТИ (1935-1937 гг., Казань), павильон ТАССР на ВСХВ (1937-1939 гг., Москва) и его реконструкция (1951-1956 гг.), государственный театр оперы и балета имени М. Джалиля (1948-1956 гг., Казань), здание районной почты (вариант в камне и вариант в дереве (1947 г., в ряде районов СССР), речной вокзал (1957-1962 гг., Казань); 15 наименований жилых объектов (14 из них – типовые сельские жилые дома для различных регионов СССР в период восстановительного строительства после Великой отечественной войны и 1 дом для специалистов в Казани (1932-1933 гг.)); 9 наименований монументальных памятников: типовой памятник героям ВОВ (1945г., в ряде районов СССР), памятник Н.И. Столярову (1950 г., Казань), памятник генералу И.А. Плиеву (1950 г., Орджоникидзе), памятник основоположнику осетинской литературы Коста Хетагурову (1954-1955 гг., Орджоникидзе), памятник А.С. Пушкину (1953-1956 гг., Казань), памятник народному поэту Татарии Г. Тукаю (1953-1956гг., Казань), монументальный фонтан у театра оперы и балета имени М. Джалиля (1954-1956 гг., Казань), памятник В.И. Ленину (1958 г., Хотьково), памятник народному герою Башкирии С. Юлаеву (1967 г., Уфа); 3 наименования монументальных авторских композиций: скульптурная композиция фронтона главного портика театра государственного оперы и балета имени М. Джалиля (1953-1956 гг., Казань), фасадные майоликовые композиции-панно для речного вокзала (1959-1961 гг., Казань), интерьерные панно-графито для речного вокзала (1960-1961 гг., Казань); 2 градостроительных проекта: авторское участие в разработке генерального плана жилого поселка (1947 г., Гори, Грузинская ССР) и авторское участие в проекте восстановления г. Ростова (1945-1950 гг., Ростов).

Выявлены неосуществленные проекты архитектора, которые представляют собой 13 наименований проектов общественных зданий: проект дворца культуры для Авиастроя (1932 г., Казань), проект дворца культуры (1934 г., Казань), проект Уральского филиала Академии наук СССР (1934 г., Свердловск), проект Казанского института инженеров коммунального строительства (1935г., Казань), типовой проект дома отдыха для горных районов Дагестанской ССР (1937г.), типовой проект турбазы для горных районов Дагестанской ССР (1937 г.), проект здания-панорамы «Героям перекопа» (1939 г., Москва), проект наземной станции метро «Первомайская» (1936-1937 гг., Москва), проект школы в кирпиче с керамикой (1939-1940 гг., Москва), типовой проект клуба Чайханы для строительства в переселенческих колхозах Средне-азиатских республик (1940 г.), типовой проект сельского клуба со зрительным залом на 200 и на 400 человек (1940 г.), проект Мингечаурской ГЭС (1946 г.); 7 наименований проектов жилых зданий: проект жилого



дома П.П.Гусева (1949 г.), проект образцового многоквартирного жилого дома (1940 г., Казань), два типовых проекта жилых домов для строительства в переселенческих колхозах Средне-азиатских республик (1940 г.), типовой проект многоэтажного жилого дома с применением керамических материалов на фасаде (1946 г.), два типовых проекта жилых домов новой конструкции (1960 г., Москва); 7 наименований проектов памятников: проект памятника героям ВОВ (1942 г., Севастополь), проект памятника-мавзолея татарскому поэту Г. Тукаю (1944 г., Казань), проект памятника победы (1946 г., Казань), проект арки победы (1947 г., Казань), проект памятника трем погибшим членам правительства Северо-Осетинской АССР (1945 г.), проект памятника-монумента в честь победы 2-го Белорусского фронта (1946 г., Алленштейн, ПНР), проект памятника М.Ф. Фрунзе (1966 г., Фрунзе) и проект центра Москвы (1966 г., участие в коллективе МАРХИ). Составлена диаграмма осуществленных построек и неосуществленных проектов архитектора (рис. 1), которая показывает их соотношение.

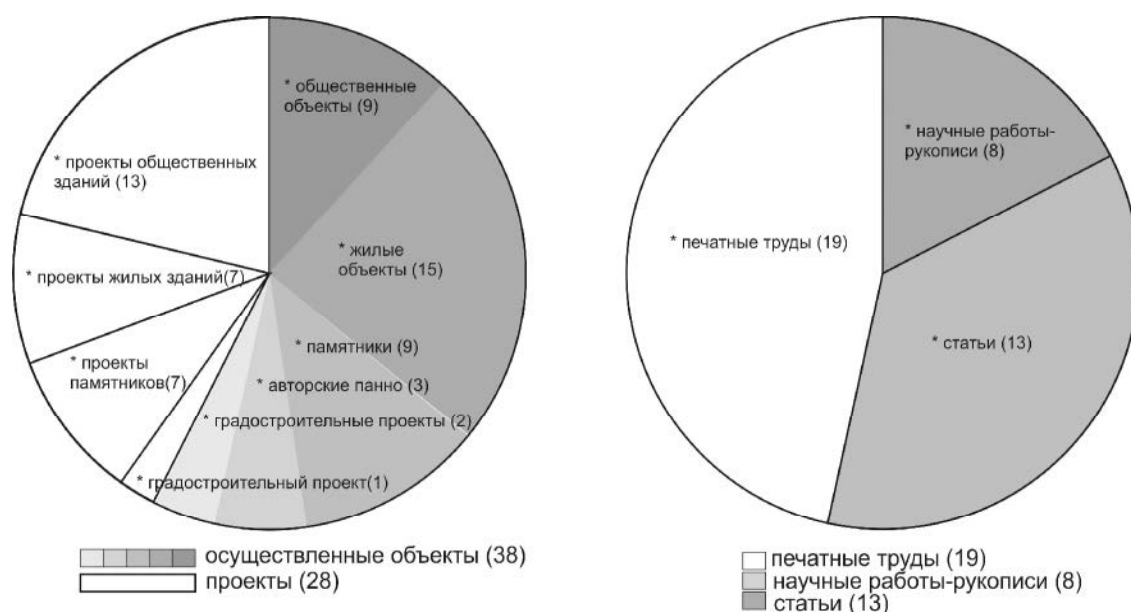


Рис. 1. Диаграммы проектной и научной деятельности архитектора И.Г. Гайнутдинова

Исследованием также вывлены научные труды и печатные работы архитектора И.Г. Гайнутдинова и составлена диаграмма (рис. 1), показывающая их соотношение (19 – печатные труды, 8 – научные работы-рукописи; 13 – статьи архитектора).

Анализ научных и печатных работ И.Г. Гайнутдинова показал, что основная часть исследований содержит материал по изучению татарской деревянной жилой архитектуры, на основании которых выявлены особенности архитектурно-пространственной организации татарских усадеб, их территории, типов жилых домов, и по изучению керамики в архитектуре. Так же весомая часть печатных работ представляет собой альбомы проектов сельских жилых домов, клубов и отделений связи, рекомендованных для восстановительного строительства в разных регионах СССР.

Анализ реализованных и нереализованных проектов и научных трудов архитектора И.Г. Гайнутдинова позволил хронологически выделить основные периоды в его творчестве (рис. 2, 3): **1932-1940 гг.** – освоение и переработка классического наследия; **1941-1948 гг.** – период проектирования для восстановительного строительства (обеспечение недорогим и рациональным жильем и объектами обслуживания населения, увековечивание победы русского народа); **1948-1956 гг.** – период проектирования Государственного театра оперы и балета имени Мусы Джалиля в Казани (уникальный синтез классического наследия и национальных приемов формообразования); **1956-1966 гг.** – период, ориентированный на индустриальные методы строительства.

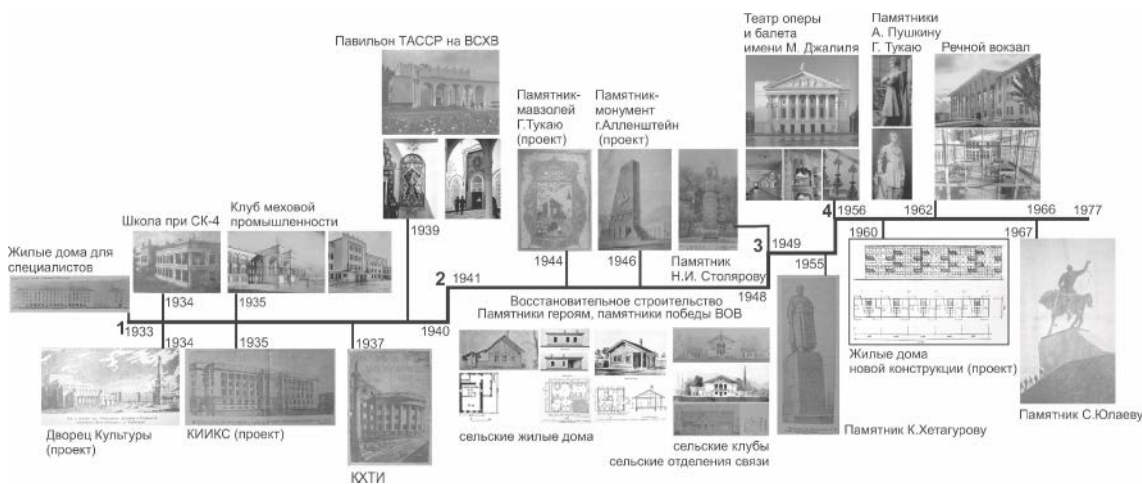


Рис. 2. Периодизация проектной деятельности архитектора И.Г. Гайнутдинова



Рис. 3. Периодизация научной деятельности архитектора И.Г. Гайнутдинова

**Первый творческий период архитектора (1932-1940 гг.)** определялся деятельностью в рамках архитектурно-проектной работы в мастерской Казгорисполкома и обучением в аспирантуре Академии Архитектуры СССР и характеризовался влиянием известных неоклассицистов: А.В. Щусева, И.В. Жолтовского. Значимость творчества И.Г. Гайнутдинова в этот период заключалась в профессиональном изучении архитектурного наследия Татарии и использовании его прогрессивных традиций в архитектуре, а в частности, в переработке классического наследия в уникальный синтез традиционных и национальных приемов формообразования. Крупные работы в этот период: школа при СК-4 в Казани (1934), проект Дворца Культуры в Казани, клуб меховой промышленности в Казани (1935), проект КИИКС (1935), КХТИ (1937). Шедевром данного периода явился павильон Татарской АССР на ВДНХ в Москве (1939). Исследование этой крупной работы И.Г. Гайнутдинова показало, что уже в ней определились основные творческие предпочтения архитектора: обилие национального декора; обращение к композиционно-пространственному построению традиционной татарской усадьбы, где центром композиции является двор; богатое решение фронтона и фасадов, выходящих во двор; пластическое построение объемов подобно принципам пластической проработки татарской усадьбы; художественно-насыщенно проработанные просматриваемые фасады; применение принципа симметрии как выразительного приема народной традиции. Эта работа определила творческий почерк архитектора и выделила его среди казанских архитекторов, о чем свидетельствует почетное выделение И.Г. Гайнутдинова в качестве представителя в комиссию к декаде Татарского искусства в Москве. Научно-исследовательская работа архитектора в данный период времени характеризуется двумя основными направлениями: изучением региональной деревянной архитектуры и памятников («К вопросу об архитектуре памятников Древнего Болгара», издательство Казанского института инженерно-коммунального строительства,

1935. С. 117-120) и изучение керамики в архитектуре (защита диссертации «Керамические материалы в архитектуре»).

**Второй творческий период архитектора (1941-1948 гг.)** – период проектирования для восстановительного строительства во время и после Великой Отечественной войны (обеспечение недорогим, рациональным жильем и объектами обслуживания населения, увековечивание победы русского народа). Он определялся проектной деятельностью И.Г. Гайнутдинова в качестве старшего научного сотрудника в институте Градостроительства Академии Архитектуры СССР, а также работой в творческих экспериментальных мастерских Академии Архитектуры СССР. Этот период характеризовался экономическими потребностями страны, и, как следствие, плодотворной работой в рамках программ и конкурсов по приказам Комитета по делам архитектуры при СНК СССР в целях получения высококачественных проектов сельских жилых домов для освобожденных от оккупации районов СССР. Проектирование для сельской местности осуществлялось наряду с известными российскими архитекторами: академиком В.Н. Семеновым, академиком А.А. Весниным. В это время архитектор продолжал исследовательскую работу по изучению татарской деревянной сельской архитектуры.

Методология проектирования архитектора в данный период строилась на принципах рационализма и традиционализма. Основным требованием к проектам являлось целесообразное и полное разрешение вопросов, обусловленных национально-бытовыми особенностями жизни колхозников и рабочих сельскохозяйственных предприятий и отражения в проектах сложившихся традиций и организации жилища [6]. Согласно разработанным программам, «внешний облик жилых домов должен быть архитектурно-выразительным в своем образе сельского жилища и отражать лучшие художественные стороны народного зодчества и строительных навыков своего края».

Анализ типовых домов, спроектированных И.Г. Гайнутдиновым для разных регионов СССР, дает основания утверждать, что при выборе фасадного и планировочного решений, архитектор опирался на традиционные и формообразующие принципы в каждого отдельно взятого региона (в южных регионах – это наличие террас, плоских крыш, саманных стен; в средней полосе РСФСР – наличие сеней, скатных крыш, декор фронтона и наличников, рубленых стен и др.) [7]. Отдельное место в проектировании для восстановительного строительства занимают сельские отделения связи и сельские клубы (варианты в камне и дереве), также адаптированные под определенные региональные условия и традиции. Используя свои научные исследования по изучению особенностей исторических усадеб, в период 1941-1948 гг. архитектором было разработано более 20 проектов для разных национальных республик, адаптированных под их традиции и климатические условия. Печатные работы архитектора в это время соответствуют тематике проектирования – «материалы о проектировании жилых домов», альбомы проектов с подробным обоснованием строительства, составление программ-заданий на проектирование для восстановительного строительства.

Второе направление в данный творческий период – проектирование памятников в честь победы в Великой Отечественной войне – определялось политикой и идеологией страны и характеризовалось работой в рамках открытых и закрытых конкурсов по приказам Комитета по делам архитектуры при СНК СССР.

**Третий творческий период архитектора (1948-1956 гг.)** – период проектирования Государственного театра оперы и балета имени Мусы Джалиля в Казани. Строительство этого значимого для республики объекта определило уровень профессионализма И.Г. Гайнутдинова и возвело его ранг ведущего татарского архитектора своего времени. Уникальный синтез классического наследия и национальных приемов формообразования, выраженных в фасадных и интерьерных решениях, где по богатству и разнообразию татарских национальных форм архитектуры и орнаментальных узоров объект является единственным примером такого рода в республике. Только одна коллекция разнообразных, тонко прорисованных орнаментов, выполненных в гипсе, бронзе и других материалах потребовала большой кропотливой многолетней научной работы по всестороннему изучению татарского народного творчества. В архиве имеется справка,

подписанная И.В. Сталиным, о значительном увеличении суммы, выделяемой на строительство театра после рассмотрения чертежей и эскизов И.Г. Гайнутдинова. Архитектор И.Г. Гайнутдинов проектирует здание театра, будучи занятым проектной, исследовательской и преподавательской деятельностью в Московском архитектурном институте (прошел путь от доцента (1949) до профессора в МАРХИ (1966)), не прерывая связь с родной Татарией. Печатная работа в этот период характеризуется подробной рукописью с описанием архитектурно-художественного оформления и технических характеристик сооружения: «К проекту и строительству здания Государственного театра оперы и балета имени М. Джалиля в Казани».

Творческий метод, которым руководствовался архитектор, можно охарактеризовать, как уникальный синтез классического архитектурного наследия и национальных приемов формообразования. Архитектор использовал такие творческие приемы, как детальная проработка фрагментов фасадов и интерьеров (фронтон, капителей, наличников, обрамлений проемов и др.), обилие и измельченность авторского декора и возведение его в ранг главного выразительного средства [8].

**Четвертый творческий период архитектора (1956-1966 гг.)** ориентирован на индустриальные методы строительства в связи с новой политикой страны (постановление № 1871 ЦК КПСС и СМ СССР от 4 ноября 1955 года «Об устранении излишеств в проектировании и строительстве»). Наиболее значимый проект в этот период Речной вокзал в Казани (1957-62). Творческий метод архитектора характеризуется введением керамических стилизованных крупномасштабных элементов на фасады и в интерьеры зданий. Простой и функциональный объем «оживляется» за счет авторских майоликовых композиций-панно, графитовых панно и стилизованных решеток в национальной тематике.

Большое достижение архитектора в этот период – проектирование жилых домов новой конструкции (1960), отмеченное высшей премией на международном конкурсе на экспериментальный жилой район на юго-западе Москвы. Изобретение архитектором И.Г. Гайнутдиновым новой организации несущих частей дома – поперечно расположенных пилонов из малых объемных элементов – образует квартиры с любой планировкой, свободной ориентацией дома и сквозным проветриванием и дает большой экономический эффект. Это значимое достижение как в области архитектуры того времени, так и в области строительства. Печатные работы в этот период сопровождают проектные достижения архитектора в индустриальном строительстве «Жилые дома новой конструкции» [9]. В этот период подытожены и многолетние исследования архитектора И.Г. Гайнутдинова по изучению татарской деревянной сельской архитектуры: «Деревянное зодчество казанских татар (резные решетки на тесовых оградах)», где архитектором представлены документальные (обмерочные) данные одного из видов татарского зодчества [10]; и с 1975 года – «Национальные черты жилища казанских татар» (журнал «Архитектурное наследие», М.: Стройиздат, 1975, № 23. С. 144-158), «Народные традиции в планировке селений казанских татар» (журнал «Архитектурное наследие», М.: Стройиздат, 1975, № 23. С. 102-109), «Сельская усадьба казанских татар середины XIX века» (журнал «Архитектурное наследие», М.: Стройиздат, 1975, № 23. С.56-64), «Интерьер сельской избы казанских татар XIX века» (журнал «Архитектурное наследие», М.: Стройиздат, 1980, № 28. С. 169-181). Целью этих научных работ было выявление и анализ особенностей архитектурно-пространственной организации татарских усадеб и их территории.

Анализ проектов и научных трудов архитектора показал, что И.Г. Гайнутдинов в течении всей жизни работал над созданием научно-практической базы для формирования архитектуры региона, обладающей чертами культурной идентичности и выработал уникальные творческие методики:

– в периоды (1932-1940 гг. и 1948-1956 гг.) – это освоение и переработка классического наследия в уникальный синтез традиционных и национальных приемов формообразования (клуб работников меховой промышленности (1934-1935 гг.), школа при СК-4 (1933-1934 гг.), проект дворца культуры для г. Казани (1934 г.), павильон Татарской АССР на ВСХВ в Москве (1937-1939 гг.), театр оперы и балета имени М. Джалиля в Казани (1948-1956 гг.);

– в период проектирования для восстановительного строительства (1941-1948 гг.) – обращение к композиционно-пространственному построению традиционной татарской усадьбы (жилые дома для районов Средней полосы СССР, жилые дома для колхозов Татарской АССР) и обращение к традиционным планировочным и формообразующим принципам застройки в каждом отдельно взятом регионе (жилые дома для колхозов Киргизии, Среднеазиатских республик и др.);

– в период, ориентированный на индустриальные методы строительства (1956-1966 гг.) – введение майоликовых и керамических стилизованных элементов на фасады зданий (речной вокзал в Казани (1957-1962 гг.)).

В рамках этих методик необходимо указать на следующие методологические приемы, используемые архитектором И.Г. Гайнутдиновым для достижения своеобразия в фасадных и интерьерных решениях своих объектов: резьба по камню; резьба по дереву; керамика; майоликовые панно; панно-графитто; архитектурно-художественные решетки; гипсовая лепнина по авторским чертежам.

### **Заключение**

Исследование биографии И.Г. Гайнутдинова показывает, что архитектор имел уникальную возможность в течение творческой жизни одновременно заниматься проектированием и в Москве, и в провинции, мастерски проецируя столичный потенциал в регионы, понимая и сохраняя национальные традиции. Исследованием установлено, что под научным руководством архитектора И.Г. Гайнутдинова состоялись защиты 3-х диссертаций на соискание ученой степени кандидата архитектуры на базе Московского архитектурного института: «Архитектура кинотеатров малой и средней вместимости для условий Узбекистана» (Х.М. Убайдуллаев, 1967); «Архитектурно-планировочное решение общественных комплексов в связи с организацией движения пешеходов» (О.Н. Нахуцришвили, 1970); «Синтетические пленочные материалы в архитектуре интерьера концертных залов» (Э.Н. Агишева, 1970). Исследования И.Г. Гайнутдинова, направленные на сохранение и развитие своеобразия родного края, получили достойное продолжение в работах архитектора С.С. Айдарова, его ученика и последователя, которым разработана методика использования архитектурного наследия Татарстана в современной практике отражения национально-регионального своеобразия [11]. Это дает основание утверждать, что И.Г. Гайнутдинов подготовил ученых по проблематике национального и регионального своеобразия, определяя вектор развития этого направления на уровне всесоюзного масштаба. Кроме того, неопределимое значение творчества И.Г. Гайнутдинова в общем процессе развития архитектуры СССР в 60-е годы XX века состоит в поднятии художественного качества строительства страны введением керамических материалов на фасады зданий (новизна и актуальность в архитектурно-строительной практике) и изобретении жилых домов новой конструкции с новой организацией несущих частей дома – поперечно расположенных пилонов из малых объемных элементов, образующих квартиры с любой планировкой, свободной ориентацией дома и сквозным проветриванием, давшим большой экономический эффект в период индустриализации в стране.

### **Список библиографических ссылок**

1. Национально-региональные векторы современной архитектуры. Доклады международной научной конференции, Казань, 2014. <http://kazan.bezformata.ru/listnews/arhitekturi-posvyashennaya-pamyati-s-s-ajdarova/19415733/> (дата обращения: 15.10.2017).
2. Саначин С. Экскурс в архитектурную жизнь советской Казани. Казань : Фолиант, 2014. 238 с.
3. Айдарова Г. Н. Творческий вклад С.С. Айдарова в исследование национально-региональных традиций // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 7–14.
4. Архивные материалы из научной библиотеки имени Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета (архив редких книг и рукописей). Архивный фонд № 20. Арх. ед. 1, 3, 6, 9, 11, 16, 18, 25, 30.

5. Киносьян Н. С. О творческом методе архитектора И.Г. Гайнутдинова // Казанская наука. 2010. № 4. С. 4–9.
6. Мартынов Г. М., Князев К. Ф. Планировка и благоустройство села. М. : Издательство Академии Архитектуры СССР, 1945. С. 72–92.
7. Киносьян Н. С. Теоретический и практический вклад И.Г. Гайнутдинова в архитектуру сельских жилых домов послевоенного восстановительного строительства // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 23–29.
8. Киносьян Н. С. Творческий метод архитектора И.Г. Гайнутдинова на примере ансамбля театра оперы и балета имени М. Джалиля в Казани // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 41–47.
9. Гайнутдинов И. Г. Жилые дома новой конструкции // Известия высших учебных заведений министерства образования СССР. 1965. № 1. С. 155–162.
10. Гайнутдинов И. Г. Деревянное зодчество казанских татар (резные решетки на тесовых оградах). Казань : Таткнигоиздат, 1960. 56 с.
11. Айдарова-Волкова Г. Н., Краснобаев И. В. Национально-региональные основы архитектуры Татарстана в трудах С.С. Айдарова. Казань : КГАСУ, 2014. 309 с.

**Kinosyan N.S.** – senior lecturer

E-mail: [kinosa@mail.ru](mailto:kinosa@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **The creative heritage of the architect I.G. Gainutdinov and his role in the general development of the architecture of the USSR in the 30-60s of the XX<sup>th</sup> century**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the work is to conduct a special research devoted to the study of the creative activity of the architect I.G. Gainutdinov (analysis of realized and unrealized architectural objects performed by I.G. Gainutdinov personally or in co-authorship with other architects; analysis of scientific works and publications of I.G. Gainutdinov; revealing the periodization of the creative path and the evolution of architect's style preferences).

*Results.* A complete list of realized and unrealized projects, scientific works and publications of I.G. Gainutdinov has been compiled; the periodization of project and scientific activity has been revealed and every creative period of the architect has been described. I.G. Gainutdinov's role in the overall development of the architecture of the USSR in the 30-60s of the XXth century has been determined. Archival materials have been put into scientific circulation.

*Conclusions.* The following basic creative achievements of the architect I.G. Gainutdinov were revealed:

1. The study of folk traditions in architecture, the application of its progressive aspects into modern creative practice and the training of scientists on the problems of national and regional identity at the level of the whole country.

2. Study of ceramics in architecture and raising the artistic quality of the country's construction by using ceramic materials on the facades of buildings.

3. Development of residential buildings of a new design, which produced a great economic effect during the period of industrialization in the USSR.

**Keywords:** architect I.G. Gainutdinov, national and regional traditions, project and scientific activities, periodization, creative heritage.

#### **References**

1. National-regional vectors of modern architecture. Reports international scientific conference, Kazan. <http://kazan.bezformata.ru/listnews/arhitekturi-posvyashennaya-pamyati-s-s-ajdarova/19415733/> (reference date: 15.10.2017).
2. Sanachin S. Excursus to the architectural life of Soviet Kazan. Kazan : Foliant, 2014. 238 p.

3. Aidarova G. N. S.S. Aidarovs creative contribution in the study of national regional traditions // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 2 (28). P. 7–14.
4. The archival photo materials from the scientific library by N. I. Lobachevsky of the Kazan State University (the archive of rare books and manuscripts). *Archival fund* № 20. Op. 1, 3, 6, 9, 11, 16, 18, 25, 30.
5. Kinosyan N. S. About creative method of architect I.G. Gajnutdinov // *Kazanskaya nauka*. 2010. № 4. P. 3–9.
6. Martinov G. M., Knjazev K. F. Planning and improvement of the village. M. : Izdatelstvo Akademii Arkhitekturi SSSR, 1945. P. 72–92.
7. Kinosyan N. S. Theoretical and practical contribution into the architecture of country houses of the post-war reconstruction building // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 2 (36). P. 23–29.
8. Kinosyan N. S. A creative method of architect I. G. Gainutdinov in Musa Jalil Tatar State Academic Theatre of Opera and Ballet in Kazan // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 2 (32). P. 41–47.
9. Gainutdinov I. G. Residential buildings of new construction // *Izvestiya visshih ychebnykh zavedenii Ministerstva obrazovaniya SSSR*. 1965. № 1. P. 155–162.
10. Gainutdinov I. G. Wooden architecture of the Kazan Tatars (carved lattices on board fencings). Kazan : Tatknigoizdat, 1960. 56 p.
11. Aidarova-Volkova G. N., Krasnobaev I. V. National-regional basics of the architecture of Tatarstan in the works of S.S. Aidarov. Kazan : KGASU, 2014. 309 p.

УДК 72.03

**Надырова Д.А.** – старший преподаватель

E-mail: [dilyaran@yandex.ru](mailto:dilyaran@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

## **Многофункциональные досуговые комплексы Казани середины XIX-начала XX вв.**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить особенности формирования архитектуры сословно-досуговых клубов как одного из типов многофункциональных комплексов Казани.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что выявлены особенности функциональной наполненности и архитектуры сословно-досуговых клубов Казани, стилистика архитектуры этих зданий.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для истории архитектуры состоит в том, что сословно-досуговые клубы Казани исследованы как многофункциональные комплексы – прообразы современных культурно-развлекательных зданий-клубов, дворцов культуры и т.д. Установлено, что сословно-досуговые комплексы Казани развивались в общероссийском и западноевропейском русле; строительство их осуществлялось по специальным проектам или путем реконструкции и объединения одного или нескольких ранее существовавших зданий; для зданий сословно-досугового назначения были характерны симметрично-осевая композиция; сочетание зрелищной, культурно-развлекательной, торговой, деловой, общественного питания, жилой, образовательной и других функций; оформление фасадов и интерьеров зданий осуществлялось в стиле эклектики.

**Ключевые слова:** клуб, многофункциональность, архитектурный стиль, история архитектуры, сословие, досуг.

### **Введение**

Досуговая сфера городов имеет огромное значение для их развития. Она формирует общественное сознание и ценностные ориентиры различных слоев общества. Актуальность исследования заключается в том, что: 1. Архитектура досуговых учреждений Казани середины XIX-начала XX вв. является малоисследованной сферой культурного наследия. При этом здания подобного типа продолжают занимать в пространственной структуре и историческом облике города важное место. 2. Опыт организации архитектурных зданий и комплексов для проведения досуга в городах дореволюционной России может быть использован в современных условиях.

В историографии вопроса представлены работы, посвященные стилистике архитектуры сословно-досуговых зданий столичных городов Москва и Петербург [1, 2]; исследованиям объемно-планировочных и стилистических решений этого типа зданий губернских городов России [3, 4]. Интерес представляет историко-культурологическое исследование досуга провинциального города рассматриваемого периода [5]. В последнее десятилетие возрос интерес к дореволюционным клубным зданиям, как прообразам современных культурно-развлекательных зданий [6, 7].

Анализ историографии по теме исследования показал, что комплексно данная проблема историками архитектуры России не исследовалась. В зарубежной историографии представлены исследования по архитектуре сословно-досуговых учреждений Великобритании и других стран Западной Европы. Причем особое внимание уделялось клубам джентльменов и клубам по интересам.

### **Основная часть**

Социально-досуговые центры сложились еще в эпоху античности, и в процессе развития приобрели форму сословных объединений, собраний, различных братств, землячеств и других. В XVII в. в Западной Европе, а именно в Англии, появилась, новая



форма таких центров – клуб. Клубы являлись формой социально-сословной организации, которая была создана в Англии, а позже в XVIII в. нашла свое воплощение в новом архитектурном типе здания в Лондоне [8]. В XVIII-XIX вв. клубы Англии развивались по двум направлениям. В первом – клуб формировался как постоянно действующее учреждение на базе кофеин и таверн, функции которых были расширены за счет устройства помещений для временного проживания. Постепенно клубы стали представлять клубы-дворцы с управляющими и обслуживающим персоналом для людей одного социального круга со статусом джентльменов. Клубы были, по сути, вторым домом, где люди могли отдыхать, общаться со своими друзьями, играть в настольные игры, обедать и даже проживать какое-то время. Архитектура клубов первого направления часто носила характер особняков, дворцов или фешенебельных квартир. Известные и богатые клубы строили те же архитекторы, что возводили лучшие загородные дома того времени, и они имели те же типы интерьеров [9].

В XIX и XX веках клубы рассматривались как важнейшие учреждения в жизни мужчин социальных верхов. Они представляли гостиницы по типу обычных домов и предусматривали такие помещения для различных функций, как: столовая, библиотека, комнаты для настольных игр и других развлечений, спальни, ванные комнаты и туалеты, кабинеты и оранжерея и т.д. Во многих отношениях они походили на обычные дома с расширенными функциями. В основном эти клубы носили сословный, гендерный или профессиональный характер и изначально создавалась для мужчин – представителей английского высшего класса. Такие мужские (джентльменские) клубы носили закрытый характер [10]. Сосредоточение в клубах многих функций с преобладанием досуговых (зрелищных и развлекательных) и обслуживание преимущественно представителей одного сословия позволяет отнести их к типу многофункциональных сословно-досуговых комплексов.

При развитии по второму направлению клуб, как учреждение, не имел постоянного здания, а для встреч единомышленников арендовались помещения различных зданий. К этой группе относились спортивные клубы: шахматные, яхтные, гимнастические и другие, а также клубы по интересам: литературные, музыкальные, художественные и т.д. В эту группу входили и клубы, существовавшие периодически и эпизодически. Это были исключительно мужские клубы, в уставах которых особо отмечался запрет на посещение клуба женщинами.

К началу XX века в России сложились два типа зданий для проведения досуга по сословному принципу. К первому типу относились здания сословных собраний и обществ, организованных привилегированными слоями для проведения коллективного досуга по интересам. Они существовали по сословным и профессиональным принципам самоорганизации. Здания второго типа представляли собой рабочие клубы, основными целями которых были организация досуга и культурно-просветительную деятельность пролетариата. Появившиеся в России в 1880-е годы такого типа клубы назывались народными домами и функционировали под патронажем благотворительных обществ и профсоюзов.

Первый тип зданий берет свое начало от Российского благородного собрания, дворянского сословного учреждения в форме общественного клуба, открытого в Москве в 1783 году. Членами Благородного собрания могли быть представители потомственных дворян, как мужчины, так и женщины, которые платили взносы для развития и содержания данного собрания. В 1784 г. у бывшего московского генерал-губернатора В.М. Долгорукова Благородное собрание приобретает усадебный дом первой половины XVIII века. По проекту московского архитектора М.Ф. Казакова в конце XVIII века дом был реконструирован для нужд Благородного собрания путем объединения всех усадебных построек в одно здание с возвышавшимся над ним колонным залом. Это был первый опыт создания здания для благородного собрания путем реконструкции.

В конце XVIII - начале XIX вв. благородные собрания начали появляться во многих городах России. Изначально они арендовали городские особняки усадебного типа, в которых устраивали парадные залы, гостиные, библиотеки и читальные залы, рестораны и бильярдные, превращая их в многофункциональные комплексы. В Москве и Петербурге Английские клубы появились в последнюю четверть XVIII в., куда входили

только потомственные дворяне (Завьялова Л. В. Петербургский Английский клуб, 1770-1918. Очерки истории. СПб. : Эра, 2004. 263 с). Английские мужские клубы имели распространение во многих странах Западной Европы и Северной Америки. Российские клубы практически не отличались от зарубежных клубов подобного типа.

Помимо вышеуказанных клубов, существовали и более ограниченные дворянские сообщества, такой как Императорский яхт-клуб, созданный в середине XIX века в Санкт-Петербурге. Доступ туда имели только представители высшей аристократии. [11].

В Казани Дворянское собрание размещалось в различных зданиях. В 1814 г. в Петропавловском переулке (ул. Рахматуллина) был куплен дом Осокина, построенный в начале 1760-х гг. предположительно по проекту архитектора В.И. Кафтырева в стиле барокко. К первоначальному трехэтажному кирпичному зданию прямоугольной формы с северной и южной стороны были пристроены два крыла. В одном из них устроили гостиницу для дворян. В основном здании разместились парадный зал, гостиные и другие общественные помещения. В 1842 г. это здание сгорело в пожаре.

В 1844 г. по заказу Дворянского собрания Казанской губернии архитектором М.П. Коринфским был разработан проект нового здания в стиле позднего классицизма. Однако проект не был утвержден в Санкт-Петербурге, а затем передан на переработку петербургскому архитектору Н.Е. Ефимову. Строительство здания велось в 1845-1854 годах на углу пересечения Театральной (Свободы) площади и Грузинской (Карла Маркса) улицы. Симметричное трехэтажное здание в неоренессансном стиле включало парадный зал с колоннами коринфского ордера, несущими круговой балкон, столовые, буфетную, гостиные, библиотеку, клубные комнаты, гостиничные номера для приезжих дворян, канцелярию, кабинет предводителя, шинельные и туалетные комнаты, винные погреба. В двухэтажном дворе флигеле также размещались жилые номера, а в других дворовых постройках - различные хозяйственные службы. Территория комплекса с садом в юго-восточной части участка была огорожена металлической оградой на кирпичных столбах. В 1879 г. к центральному входу со стороны площади пристроили четырехколонный арочный портик с балконом.



Рис. 1. Досуговые клубы: 1. Дворянское собрание. г. Казань. Фото начала XX в.;  
2. Клуб «Athenaeum», г. Лондон. Фото 1927 г. [12];  
3. Клуб «Carlton Club», г. Лондон. Фото нач. XX в. [14]

Анализ архитектурно-планировочных и композиционных решений клубных зданий Англии, которая в XIX в. в этой области была «законодательницей мод», и здания Дворянского собрания в Казани показал, что в проекте последнего были учтены новые неоренессансные веяния в западноевропейской клубной архитектуре. Фасады казанского Дворянского собрания в стиле позднего классицизма были переделаны в стиле неоренессанса. Клубы «Athenaeum Club» и «The Reform Club», построенные на ул. Pall-Mall в Лондоне в конце 1830-х, имеют не только сходную с казанским клубом объемно-планировочную структуру, центром которой является двусветный зал с балконом на колоннаде, но и ренессансную стилистику фасадов [12]. Аналогичную или близкую к ней объемно-планировочную структуру имеют и другие лондонские клубы [13, 14]. Это говорит о том, что в Петербурге властные структуры и архитекторы были знакомы с образцами английских классических клубов того времени.

Помимо этого, сравнительный анализ объемно-планировочных решений зданий английских клубов и Дворянского собрания Казани показал, что главные залы клубов располагались на втором этаже по главному фасаду, выходя окнами на улицу. При общей

асимметрии плана уличные фасады клубов отличались осевой симметрией. В здании Дворянского собрания Казани устраивались балы, благотворительные мероприятия, концерты артистов и встречи с приезжими знаменитостями, деловые встречи и клубные мероприятия и т.д. Допускались в Дворянское собрание представители дворянского сословия. В 1903 г. была произведена реконструкция интерьеров некоторых помещений здания.

Отличие зданий дворянских собраний Российской империи как сословно-досуговых центров для высших слоев общества от сословных клубов Великобритании и стран Западной Европы заключались в том, что они имели общественно-развлекательный характер и не несли гендерный отпечаток.



Рис. 2. Сравнение планировочных структур клубных зданий  
1-2. Клуб «The Athenaeum» в Лондоне. 1828-1830 гг. Планы 1 и 2-го этажей 1882 г. [12];  
3-4. Дворянское собрание в Казани. 1844-1859 гг. План-схемы 1 и 2-го этажей конца XIX в.  
(схемы Надыровой Д.А.)

Появление в Великобритании в викторианскую эпоху среднего класса в значительной степени связано с ростом городов и подъемом экономики. Начиная с середины XVIII века, этот термин используется для обозначения социальной прослойки между аристократией и рабочими. В Западной Европе и России во второй половине XIX в. её составлял широкий и разнообразный диапазон населения. Наряду с предпринимателями, связанными с крупным производством, в этот период увеличивается число мелких предпринимателей, лавочников и купцов. Развитие промышленности способствовало развитию торговли и финансов, а также появлению таких учреждений, как банки, страховые компании, торговые дома и т.д. Для функционирования их требовались клерки, менеджеры и другие наемные специалисты. Формировался слой государственных служащих, учителей, врачей, юристов, инженеров, менеджеров и других специалистов. Следовательно, средний класс был неоднородным и включал разные слои, которые, обладая разными интересами, организовывали свои клубы.

С 1850 по 1914 гг. в европейских странах, в т.ч. и России, появились и развивались художественные, литературные, театральные, политические, военные, профессиональные, спортивные, университетские, социальные (общественные) и другие клубы.



Рис. 3. Здание Купеческого собрания. Казань. 1903 г. Фото начала XX в.

С развитием промышленного капитализма формируется прослойка предпринимателей, промышленников, которые дополняют довольно многочисленный слой купечества. В городах формируются купеческие или коммерческие собрания. Происходит дифференциация зданий по классовому и сословному признакам, что стало стимулом развития новых типов зданий и разнохарактерности архитектуры, отражающей многообразие российской культуры того времени. Строятся сословные клубы (купеческие, мещанские), дома собраний и обществ. Также, как и в зданиях Дворянских собраний, непременным элементом таких зданий являлся большой зал для деловых собраний, балов, музыкальных вечеров и театральных представлений. В них формируется относительно типовый набор функций, которые могли выполняться одновременно или в разное время. Здесь налицо многофункциональный характер подобных зданий, как правило, представляющих целый комплекс. В них синтезированы функции культурно-развлекательная, общественно-деловая, коммуникативная, сервисная, жилая, общественного питания и другие.

Купеческий клуб в Казани был открыт 9 ноября 1861 года в доме купца Тихонова на Большой Проломной улице. Затем Купеческое собрание снимало дом на Воскресенской улице у купца С.И. Пчелина дом, в котором на втором этаже размещался зал с обширным балконом на чугунных колоннах. В конце XIX в. собрание размещалось в доме купца Щетинкина на ул. Большая Проломная. Следовательно, как и Дворянское собрание, Купеческое собрание более 40 лет довольствовалось съёмными домами, в которых был большой зал. В начале XX в. Купеческое собрание выкупило у наследников купца Н.М. Журавлева дом, построенный еще в 1824 году купцом К.Е. Подуруевым. В 1903 г. была проведена реконструкция дома с включением в обновленное здание флигелей и устройством зрительного зала со сценой, зала для танцев, ресторана гримерных и других дополнительных помещений. Во дворе располагались жилые помещения для приезжих гостей. Угол здания оформлен широким многогранным эркером на мощных консолях. Фасады здания реконструированы в стиле эклектики классицистического направления. Общественный характер зданию придает возвышающаяся сценическая коробка.

Помимо этих двух крупных сословно-досуговых центров во второй половине XIX – начале XX вв. в Казани существовали клубы «Русское соединенное собрание» (1872 г.), «Шахматный клуб» (1875 г.), «Военное собрание» (1880-е гг.). В этот период образуется большое количество клубов по интересам, которые арендовали отдельные помещения или постройки. В 1906 г. в доме купца К. Апанаева на ул. Евангелистовская (Татарстан, 8) открылся Восточный клуб, организованный татарской интеллигенцией. Как и в других клубах, был устроен зал со сценой, имелись клубные помещения и читальный зал с библиотекой книг на татарском, русском и других языках.

В последней трети XIX в. в России получили распространение так называемые народные дома. Строились они для удовлетворения духовных потребностей рабочих, а

также для организации их досуга. Позднее они стали возникать в Англии, Шотландии, Германии, странах Скандинавии и т.д. В США подобных учреждений не было.

Народные дома России XIX-начала XX века включали в себя и образовательную и досуговую деятельность. Там располагались как библиотеки с читальней, музеи, воскресные школы, вечерние классы, так и театральные залы со сценой, чайные, книжные лавки, разнообразные выставки и т.д. Как правило, народные дома до 1914 г. были государственными, но встречались и такие, построенные и финансируемые частными благотворителями.

В Казани народный дом представлен так называемым Алафузовским театром, располагавшимся на берегу Казанки в Ягодной слободе на ул. Архангельская (совр. ул. Гладилова). Строительство «Александровского образовательного дома», названного в честь императора Александра II, началось в 1898 г. по проекту архитектора Л.К. Хрщоновича и завершилось в 1900 году. Чаще его называли «Алафузовский народный театр», «Алафузовский образовательный дом». Это симметричное, в плане «Т» – образное, двухэтажное с освещенным цокольным этажом здание в стиле эклектики классицистического направления с чертами архитектуры ренессанса.

В начале же XX в. в Алафузовском образовательном доме размещались фабрично-заводская школа с учебными аудиториями на двести учащихся, ясли для детей рабочих, клуб служащих, библиотека-читальня, зрительный зал на 900 мест со сценой для народного театра, физический кабинет и музей, библиотека, читальня, чайная и столовая, приют для рабочих и другие помещения [15].



Рис. 4. Александровский образовательный дом (Алафузовский народный театр). 1900 г.  
Арх. Л.К. Хрщонович. Фото начало XX в.

Учебные аудитории и клубные помещения располагались на двух этажах уличной части здания. Они соединены поэтажными коридорами, в концах которых размещены лестницы с выходом на улицу. По оси здания возвышается двухэтажный объем, в котором размещены вестибюль с главным входом и зрительный зал со сценой. Над углами здания выступают невысокие квадратные в плане башни под четырехгранными куполами со шпилями. Поперечная часть здания была покрыта четырехскатной крышей и увенчана куполом. Сдвоенные пилястры, глубокая рустовка стен 1-го этажа, высокие арочные окна, профилированный карниз и криволинейные аттики фасадов, придают зданию вид дворца. Неоренессансный облик народного дома диссонировал с окружающей застройкой Ягодной слободы – фабрично-заводской окраины Казани. Однако он стал настоящим образовательным и культурно-просветительным и развлекательным центром рабочей слободы. Современники отмечали не только высококлассную архитектуру и оформление интерьеров здания, но и качественное оборудование помещений различного назначения. Архитектура здания подчеркивала ту важность и значимость, которую вкладывали в данный центр для рабочих предприниматели Алафузовы. Столь монументальный облик и пышное оформление

фасадов народных домов было характерно и для других городов России первых десятилетий XX века. Здания народных домов, строившиеся преимущественно на государственные деньги, своей архитектурой как бы разрушали сословные границы российского общества.

Здания сословно-досугового назначения в Казани являются памятниками исторического прошлого, на основе которых развились многие клубные объекты советского времени и в настоящее время они появляются в современной интерпретации. Такая связь «старого» и «нового» обеспечивает преемственность архитектурных типов в современных условиях [16].

*Выводы.* Появившись в конце XVIII-первой половине XIX в. как социально-культурные образования, сословно-досуговые центры до середины или конца XIX в. не имели своих собственных зданий, а снимали здания или усадебные комплексы и приспособляли их для своих нужд. Многолетний опыт функционирования в неприспособленных условиях позволил их управляющим комитетам выработать требования и своеобразные «задания на проектирование» архитекторам, проектировавшим и строившим здания Дворянского собрания и Купеческого собрания на собранные по подписке деньги будущих членов. Александровский народный дом, построенный на деньги Алафузовых, воплотил в себе все лучшие черты народных домов России конца XIX-начала XX вв. Фасады и интерьеры этих трех комплексов решены в стиле эклектики классицистического направления с мотивами и элементами ренессансной архитектуры. Временной разрыв между строительством зданий Дворянского собрания и Алафузовского народного дома в 50 лет был практически нивелирован дворцовой архитектурой этих зданий, которая демонстрировала изменение социально-политических настроений в российском обществе начала XX века.

Значимость полученных результатов для истории архитектуры состоит в том, что сословно-досуговые клубы Казани исследованы как многофункциональные комплексы – прообразы современных культурно-развлекательных зданий-клубов, дворцов культуры и т.д. Установлено, что: сословно-досуговые центры Казани развивались в общероссийском и западноевропейском русле; строительство их осуществлялось по специальным проектам или путем реконструкции и объединения одного или нескольких ранее существовавших зданий; для зданий социально-досугового назначения были характерны в целом симметрично-осевая композиция; сочетание зрелищной, культурно-развлекательной, торговой, деловой, общественного питания, жилой, образовательной и других функций; оформление фасадов и интерьеров зданий осуществлялось в стиле эклектики.

### Список библиографических ссылок

1. Кириченко Е. И. Русская архитектура 1830-1910-х гг. М. : Искусство, 1978. 399 с.
2. Борисова Е. А. Русская архитектура в эпоху романтизма. СПб. : Дмитрий Буланин : ГИИС, 1997. 314 с.
3. Богданова О. В. Архитектурный облик Томска. Томск : Красное знамя, 2005. С. 8. 143 с.
4. Леденева Г. Л. Гражданская архитектура Российской провинции конца XIX – начала XX вв. (на примере застройки г. Тамбова). Тамбов : изд-во ТГТУ, 2003. 80 с.
5. Малышева С. Ю. Праздный день, досужий вечер. Культура досуга русского провинциального города второй половины XIX-начала XX века. М. : Academia, 2011. 191 с.
6. Даняева Л. Н. Исторические прототипы современных деловых клубов // Архитектура. Строительство. Дизайн. 2007. № 3. С. 32–37.
7. Воробьев А. Ю. От народного дома к рабочему клубу, дворцу культуры, театру массового действия: тенденции эволюции многофункционального комплекса в России первой трети XX века // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 2. С. 33–37.
8. Sol Pérez Martínez. Club architecture: A vessel of behavior, language and politics // URL: <http://www.academia.edu/25574601/> (дата обращения: 15.06.2017).

9. Architecture of the XIX century and the Turn of the century // URL: <http://www.eptort.bme.hu/doc/egyeb/bekacomb.pdf> (дата обращения: 15.06.2017).
10. Clubs and Other Private Organizations // URL: <http://www.victorianweb.org/art/architecture/clubs/index.html> (дата обращения: 15.06.2017).
11. Клубные формы досуга. Экскурс в историю. Проблемы современности. URL: <http://danzarin.kiev.ua/our-blog/item/67-dosug.htm> (дата обращения: 15.06.2017).
12. British History Online. Plate 76: Athenaeum, Pall Mall. URL: <http://www.victorianweb.org/art/architecture/athenaeum/index.html> (дата обращения: 20.06.2017).
13. Pall Mall, South Side, Existing Buildings: The United Service Club, The Athenaeum. URL: <http://www.british-history.ac.uk/survey-london/vols29-30/pt1/pp386-399/> Version 5.0., 2015, University of London (дата обращения: 20.06.2017).
14. Pall Mall clubs. Attraction in London. URL: <http://www.mygola.com/pall-mall-clubs-p59574> (дата обращения: 20.06.2017).
15. Габдрафикова Л. Р., Салихов Р. Р. Просветительская деятельность Алафузовых в Казани (вторая половина XX-начало XX века). URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kulturno-prosvetitel'skaya-deyatelnost-alafuzovyh-v-kazani-vtoraya-polovina-xix-nachalo-xx-veka> (дата обращения: 20.07.2017).
16. Айдарова Г. Н., Айдаров Р. С. «Старое» и «новое» в условиях сохранения и развития исторического центра Казани // Материалы V Международной научно-практической конференции «Культурное наследие в XXI веке: сохранение, использование, популяризация». 3-7 апреля 2017 г. Казань, 2017. С. 20–24.

**Nadyrova D.A.** – senior lecturer

E-mail: [dilyaran@yandex.ru](mailto:dilyaran@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya str., 1

### **Multifunctional entertainment complexes of Kazan middle of the XIX-early XX centuries**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to reveal features of formation of architecture of the class clubs as one type of multifunctional complexes of Kazan.

*Results.* The main results of the study are that functional fullness and architecture of class clubs of Kazan, the style of architecture of these buildings were detected.

*Conclusions.* The significance of the results for the history of architecture is that class clubs of Kazan studied as multifunctional complexes – prototypes of the modern cultural and entertainment buildings, clubs, palaces of culture, etc. Found that class clubs of Kazan has evolved into a nationwide and European basis; the building was carried out for special projects or reconstructions and combine one or more pre-existing buildings; for buildings class clubs was characterized by symmetric-axial composition; the combination of spectacular cultural entertainment, shopping, business, catering, residential, educational and other functions; design of facades and interiors of buildings was carried out in eclectic style.

**Keywords:** club, multi-functionality, architectural style, history of architecture, class, leisure.

#### **References**

1. Kirichenko E. I. The Russian architecture 1830-1910-ths. M. : Iskusstvo, 1978. 399 p.
2. Borisova E. A. Russian architecture in the age of romanticism. SPb. : Dmitry Bulanin : GIIS, 1997. 314 p.
3. Bogdanova O. V. The architectural appearance of Tomsk. Tomsk : Red flag, 2005. P. 8. 143 p.

4. Ledeneva G. L. Civil architecture of the Russian province of the late XIX – early XX centuries (on an example of buildings in Tambov). Tambov : publishing house TGTU, 2003. 80 p.
5. Malysheva S. Yu. An idle day, idle evening. The culture of leisure of the Russian provincial town of the second half of XIX-early XX century. M. : Academia, 2011. 191 p.
6. Daniaeva L. N. Historical prototypes of contemporary business clubs // *Arkhitektura. Stroitel'stvo. Dizayn*. 2007. № 3. P. 32–37.
7. Vorobyov A. Yu. From the people's house to the work club, culture Palace, theatre of mass action: tendencies of evolution of the multifunctional complex in Russia in the first third of the XX century // *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2012. № 2. P. 33–37.
8. Sol Pérez Martínez. Club architecture: A vessel of behavior, language and politics // URL: <http://www.academia.edu/25574601/> (reference date: 15.06.2017).
9. Architecture of the XIX century and the Turn of the century // URL: <http://www.eptort.bme.hu/doc/egyeb/bekacomb.pdf>. (reference date: 15.06.2017).
10. Clubs and Other Private Organizations // URL: <http://www.victorianweb.org/art/architecture/clubs/index.html> (reference date: 15.06.2017).
11. Club forms of leisure. The excursion into history. Problems. URL: <http://danzarin.kiev.ua/our-blog/item/67-dosug.htm> (reference date: 15.06.2017).
12. British History Online. Plate 76: Athenaeum, Pall Mall. URL: <http://www.victorianweb.org/art/architecture/athenaeum/index.html> (reference date: 20.06.2017).
13. Pall Mall, South Side, Existing Buildings: The United Service Club, The Athenaeum. URL: <http://www.british-history.ac.uk/survey-london/vols29-30/pt1/pp386-399/> Version 5.0., 2015, University of London (reference date: 20.06.2017).
14. Pall Mall clubs. Attraction in London. URL: <http://www.mygola.com/pall-mall-clubs-p59574> (reference date: 20.06.2017).
15. Gabdrifikova L. R., Salikhov R. R. Educational activity of Alafuzov in Kazan (the second half of XIX-beginning of XX century). URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kulturno-prosvetitel'skaya-deyatelnost-alafuzovyh-v-kazani-vtoraya-polovina-xix-nachalo-xx-veka> (reference date: 20.07.2017).
16. Aidarova G. N., Aydarov R. S. «Old» and «new» in terms of preservation and development of historical center of Kazan // Materials of V International scientific and practical conference «Cultural heritage in XXI century: conservation, use, popularization». 3 to 7 April 2017, Kazan, 2017. P. 20–24.



УДК 72.03

**Надырова Х.Г.** – доктор архитектуры, доцент

E-mail: [nadyrova-kh@yandex.ru](mailto:nadyrova-kh@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Общественные бани-хаммам в средневековых городах Волго-Камья: формирование традиции и особенности архитектуры**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – изучить формирование традиции строительства бань-хаммам и выявить особенности их архитектуры в средневековых городах Волжско-Камского региона. На обширном библиографическом и натурном материале анализируется развитие каменных общественных бань на протяжении более шести с половиной столетий в периоды существования в регионе нескольких средневековых мусульманских государств.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что установлено существование непрерывной традиции строительства общественных бань-хаммам в Волжско-Камском регионе Восточной Европы на протяжении свыше шести столетий. Распространенный в странах мусульманского Мира тип бани-хаммам в городах Волго-Камья приобрел объемно-планировочные и строительно-технические особенности.

*Выводы.* Историко-научная значимость полученных результатов заключается в том, что установлена: 1. Не исследованность данной проблемы в историко-архитектурной науке; 2. Непрерывность в распространении и развитии бань-хаммамов в Волго-Камье на протяжении шести с половиной столетий, что способствовало сложению традиций в строительстве этого типа сооружений в регионе; 3. В истории мировой средневековой архитектуры мусульманских стран ареал распространения этого типа зданий включал и самый северный по расположению регион Волго-Камья. 4. Природно-климатические отличия региона от традиционного ареала распространения бани-хаммам в восточно-мусульманских странах обусловили появление особенностей в объемно-планировочных решениях: традиционная схема при функциональном минимуме помещений, устройство тамбуров и дополнительных печей, защита сводчато-купольных покрытий зданий от холода и атмосферных осадков путем их утолщения, устройства земляных настилов и деревянных крыш; и строительно-технических решений: уплотнение грунта деревянными сваями под фундаментами, использование обожженного кирпича в конструктивно важных местах этого типа зданий. 5. Выявленные традиции строительства и особенности архитектуры бань-хаммам Волжско-Камского региона позволяют возродить этот тип общественных зданий в городах и поселениях Татарстана на современной основе.

**Ключевые слова:** архитектура, традиции, баня-хаммам, объемно-планировочное решение, реконструкция, средневековье, ислам.

#### **Введение**

Баня-хаммам как тип архитектурного сооружения с глубокой древности и до настоящего времени имеет распространение во многих регионах с восточно-мусульманской культурой. Историко-архитектурное изучение бань-хаммам началось в середине XX века. Средневековые бани среднеазиатского, крымского и других регионов СССР и Востока были исследованы в статье В.Л. Ворониной [1]. В своей монографии, посвященной архитектуре и градостроительству средневековых городов арабских стран, она провела сравнительный анализ объемно-планировочных решений бань-хаммамов XI-XIX вв. Ближнего Востока, Египта, Сирии, Мавритании и других регионов с целью выявления их отличий и общих черт [2]. Многолетние исследования бань-хаммамов регионов Золотой Орды и мусульманского Востока обобщены в работах археологов и историков [3, 4]. Однако комплексного историко-архитектурного исследования бань-хаммам средневековых городов Волжско-Камского региона не проводилось.

На территории Волго-Камья в период средневековья существовали мусульманские государства: Волжско-Камская Булгария, Булгарский улус как часть Золотой Орды и Казанское Ханство. Археологическое изучение остатков городов этих государств региона началось в конце XIX в. и продолжается в настоящее время. В 1930-1950-е гг. были выявлены руины каменных сооружений на Булгарском городище – остатках столицы Булгарского улуса. В 1970-х гг. начались обширные раскопки в Билярском городище, увязываемом со столицей Волжско-Камской Булгарии, а в 1980-1990-е годы – других булгарских городищах. Материалы археологических раскопок позволили впервые установить существование средневековых городских общественных бань в регионе и начать их изучение [5-7]. Первые исследования и реконструкции монументальных зданий бань региона на профессиональной основе были выполнены С.С. Айдаровым [8].

Цель исследования изучить становление и развитие данного типа сооружений в регионе Волго-Камья в средневековый период, выявить архитектурные особенности в сравнении с подобными объектами других регионов мира и проследить формирование и развитие традиции его возведения.

Для достижения этой цели помимо библиографических материалов были использованы научные отчёты археологов Москвы и Казани по археологическим раскопкам XX-начала XXI вв., а также материалы натуральных исследований Билярского, Булгарского и других городищ.

### **Основная часть**

Первые бани-хаммамы восточного типа появились в Волжско-Камском регионе после официального принятия ислама в 922 г. правителем и знатью Волжско-Камской Булгарии, одного из первых раннефеодальных государств Восточной Европы. В конце первой трети X в. при закладке крупных городов Биляр и Сувар практически одновременно с главными соборными мечетями были построены бани-хаммамы. Руины каменных бань были выявлены также на остатках других крупных городов Булгарского государства – городищах: Красносундюковское I, Хулаш, Большая Тояба, Муромский городок [9, с. 34-35].

Появление монументальных каменных бань в регионе связывается с распространением ислама, потому что им придавался глубокий религиозный смысл. По заповеди Мухаммада, чистота является половиной веры, а тепло хаммама увеличивает плодovitость, приумножая исламских верующих. Всякие развлечения при банях, как театры, были строго запрещены, разрешался только массаж, беседы, настольные игры в шахматы и нарды. Строительство бань-хаммамов явилось декларацией идей ислама и мусульманского образа жизни для населения формирующегося государства.

Зарубежные исследователи бань-хаммамов X-XVIII вв. установили, что они получили распространение с переходом населения к исламу на основе опыта строительства древнеримских терм. Бани-хаммамы, наряду с мечетями и медресе, становятся знаковыми сооружениями в странах мусульманского Востока [10]. К началу IX в. хаммамы были распространены в большей части Персии, Багдадского халифата, а также в Средней Азии (Бухаре, Самарканде), Тифлисе и Армении. В арабских источниках отмечалось, что в Багдаде в XII в. насчитывалось около 2000 тысяч бань. Однако эта цифра, очевидно, сильно преувеличена [11, р. 364]. И, тем не менее, это говорит о широком распространении этого типа зданий в исламском мире в этот и более поздние периоды [12].

К началу XIII в. каменных зданий бань в Биляре, судя по результатам аэрофотосъемки начала 1970-х гг., было свыше двух десятков. Тип архитектурного сооружения бани-хаммама оказался самым распространенным в архитектуре Булгарии.

Бани представляли собой одноэтажные каменные здания с подпольным отоплением горячим воздухом, который распространялся от топки под котлами для нагрева воды. Изучение материалов археологических раскопок средневековых бань позволило восстановить планировочные структуры бань-хаммамов. В булгарских городах было распространено несколько вариантов планировок бань (рис. 1). В первом варианте квадратное или прямоугольное в плане здание разделялось перпендикулярно пересекающимися внутренними стенами на четыре помещения, в которых температура воздуха постепенно повышалась. Входное помещение и печь с котлами для воды

размещались в небольших объемах, пристроенных к основному зданию с противоположных или смежных сторон. Во втором варианте внутреннее пространство здания разделялось стенами на девять и более мелких помещений.

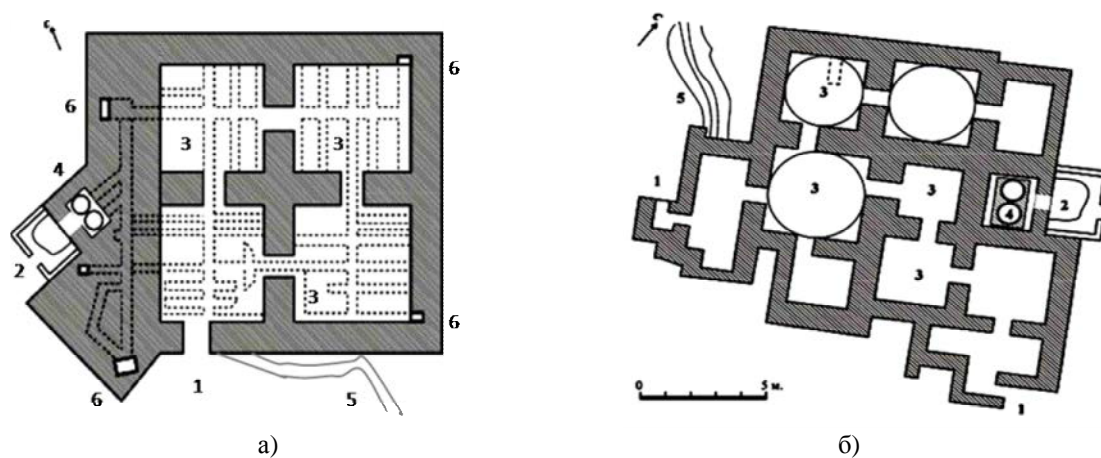


Рис. 1. Планы бань г. Биляр X-начала XIII вв.: а – I-го типа; б – II-го типа  
(реконструкция Х.Г. Надыровой по обмерам А.Х. Халикова и С.С. Айдарова):  
1 – вход; 2 – топочное помещение; 3 – моечные залы; 4 – печи;  
5 – водоотводная канава; 6 – дымоходные трубы в толще стен

В Суварском, Красносундюковском I городищах и Муромском городке были выявлены бани с I-м типом планировки, которые были возведены в X-XI вв. [9, с. 473-476]. Судя по толщине наружных и внутренних стен, каждое из трех-четырех помещений бань, вероятно, перекрывалось куполом или сводом. Именно с банями-хаммамами в регионе появились полусферические купола и полуцилиндрические своды. На плане бани (рис. 1а) пунктирными линиями показаны подпольные каналы отопления бани горячим дымом, идущим от печей. Первые бани имели толщину стен более 1,5 м. Излишний запас прочности был придан стенам иноземными мастерами, прибывшими в наш регион с Ближнего Востока и Средней Азии, очевидно, из-за опасений за работу конструкций в северном регионе с континентальным климатом. Бани II-го типа получили развитие в XII-начале XIII вв. и являлись более сложными по архитектуре объектами. Помимо большого количества помещений, в них появились тамбуры, утепляющие входы в баню, а также деревянные пристройки при печных топках, обслуживаемых снаружи. Появление этих новшеств в архитектуре бань было связано с климатическими особенностями Волжско-Камского региона.

Принятие ислама в Булгарии на международном уровне было отмечено прибытием посольства из Арабского халифата. Мусульманское посольство, прибывшее в регион Волго-Камья в 922 г. из Багдада через Среднюю Азию, имело в составе не только проповедников ислама, но и мастеров-строителей для закладки столичного города Биляр и строительства первой в регионе соборной мечети и других сооружений. Очевидно, аналоги объемно-планировочных решений бань-хаммам Волжско-Камской Булгарии логично искать в этих регионах. Однако следует заметить, что аутентичных образцов бань-хаммамов IX-XII вв. сохранилось крайне мало, и выявляются они практически только археологическими методами. Бани первого типа имели небольшие размеры и несложную функцию. Подобная тенденция от простых по архитектуре первых бань до объектов с развитой архитектурой прослеживалась в банях-хаммамах в различных регионах мусульманского мира. Так в 2008 г. в местечке Тель Тунейнир в Сирии при раскопках средневекового города с мусульманским населением были обнаружены остатки бани XII в., вероятно, существовавшей и в аббасидский период (рис. 2) [13]. На это предположение наводит мысль о том, что эта баня, как и подобные постройки в Биляре, еще не имеет того развитого плана с большим крестообразным в плане залом, перекрытым куполом и ставшим характерным для бань-хаммам в XIII-XIV веках.

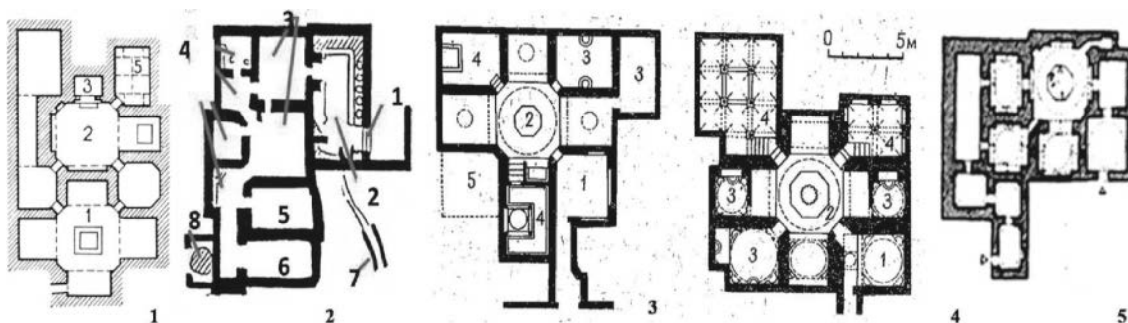


Рис. 2. Планы бань-хаммам мусульманского Востока XI-XII вв. (приведены к одному масштабу):  
 1. Ирак. Баня в г. Нигар (1. раздевальня, 2. главный зал, 3. открытый горячий водоем, 4-5. мыльня);  
 2. Сирия. Баня в г. Тель Тунейнир (1. вход, 2. раздевальня, 3. теплые комнаты, 4. горячие комнаты,  
 5. резервуар, 6. печь, 7. дренажная канава, 8. колодец);  
 3-4. Каир. Бани Нахасин и Суккария  
 (1. теплые помещения, 2. горячий зал, 3. мыльня, 4. парилка, 5. топка);  
 5. Средняя Азия. Баня в г. Бухара

Дренажная канава и колодец, обнаруженные вблизи бани в местечке Тель Тунейнир в Сирии, свидетельствуют об идентичном техническом устройстве хаммамов, как на Ближнем Востоке, так и в Волго-Камье в домонгольский период. Общественные бани в городах Египта в XI-XII вв. были относительно небольшими и сопоставимы по архитектуре с болгарскими банями. Планы египетских бань также далеки от симметрии, как и планы среднеазиатских бань. На территории Ирана в это время, наряду с банями второго типа, были распространены хаммамы с осевой композицией, когда залы последовательно размещались на одной оси [11, p. 869, figure 30]. Отличительной особенностью бань Ближневосточного и Среднеазиатского регионов было заглубление их в землю. Иногда у здания из земли виднелись только купола. Чаще здания заглублялись в землю на половину высоты. Этот прием обуславливался климатическими особенностями регионов и позволял сохранять тепло зимой и не нагреваться зданию летом.

В болгарских банях второго типа состав помещений заметно расширен. Все они связаны анфиладной системой планировки. К рубежу XII-XIII вв. бани-хаммамы с крестообразным центральным залом также получают развитие в болгарских городах. При этом угловые помещения, использовавшиеся для индивидуального мытья и массажа, связывались с центральным залом через угловые дверные проемы. Вопрос о перекрытиях в зданиях общественных бань Болгарии остается открытым. Однако, судя по толщине наружных и внутренних стен, устройство купольных и сводчатых покрытий более вероятно, чем плоских. По аналогии с банями других регионов мусульманского мира снаружи своды могли покрываться специальным водозащитным раствором. Возможно, для предохранения от атмосферных осадков над ними устраивали скатные деревянные или наружные земляные покрытия. Последний тип покрытия был характерен для деревянных семейных бань всех народов региона и служил естественным утеплителем.

Водоснабжение и водоотведение в болгарских банях было идентично баням в странах мусульманского Востока. Массивные печи с топкой наружу устраивали с торца здания. Топочное пространство снаружи здания отгораживалось тонкими каменными или деревянными стенами и имело вид небольшой, невысокой и заглубленной в землю пристройки. Для снабжения бань водой в болгарских городах устраивали водопровод из керамических труб. Вода по ним самотеком доставлялась в бани из ближайших озер, речушек или колодцев. Воду нагревали в больших каменных или медных котлах-цистернах, установленных над печами. Горячий воздух от топки печи проходил по подпольным каналам, обогревая помещения бани, и по вертикальным дымоходам, проложенным в толще стен, удалялся наружу. Существовала и система водоотведения от бань, в которой вода по канавкам в полу из мыльных помещений через водосливные отверстия, а затем по трубам или крытым каналам шла в дренажные канавы, отводившие её подальше от здания в отстойные колодцы.

Окна в городских банях Волжско-Камской Булгарии были застеклены. Однако в стенах бань окон, как правило, не было. Круглые проемы для вентиляции и освещения помещений бани устраивались в зените и по сводам куполов. Как правило, они закрывались круглыми, слегка выпуклыми стеклами. Для вентиляции помещений бани стекла убирались служащими. Помимо Биляра круглые оконные стёкла найдены также в банях Суvara и других крупных городов. Они аналогичны стеклам в постройках Ближнего Востока, Средней Азии, Закавказья. Оконное стекло производили в городах Булгарии, о чём свидетельствуют обнаруженные в Билярском городище мастерские с печами и остатками ремесленного производства оконного стекла [11].

Каменные здания бань неоднократно реконструировались, подновлялись в соответствии с требованиями времени и продолжали функционировать на протяжении длительного периода. По образцу и подобию уже существовавших в городе зданий строились новые бани.

Следовательно, по объемно-планировочной структуре бани Волжско-Камской Булгарии были близки среднеазиатским и несложным типам ближневосточных бань. Как объемно-планировочную особенность следует отметить устройство тамбуров для сохранения тепла внутри помещений.

После захвата Волжско-Камской Булгарии монгольскими войсками и включения ее территории в состав Золотой Орды Булгарским улусом, его столичным городом стал Булгар. Во второй половине XIII-XIV вв. в странах мусульманского Востока, в том числе и Золотой Орде и её Булгарском улусе, продолжалось возведение бань-хаммамов. Основным типом бани в этот период стал объем с крестообразным в плане центральным моечным залом. Объемно-планировочные структуры бань отличались в основном различной группировкой помещений вокруг этого зала.

Во второй половине XIII в. построена одна из первых каменных общественных бань города Булгар, получившая в литературе название «Восточная палата». Она располагалась в центре города юго-восточнее Соборной мечети [12, с. 249-255]. По материалам раскопок установлено, что на восточной стороне бани располагалась топчанная пристройка, к которой примыкал обширный хозяйственный двор с водоёмом-накопителем по типу среднеазиатских хаузов. Во дворе находилась землянка истопника и хозяйственные постройки [13, с. 95].

В первой половине XIV в. на береговом откосе, спускающемся к подгорной части Булгара, были построены еще три бани, аналогичные «Восточной палате». Вдоль склона на середине его высоты пролегалла улица, на которой в ряд между жилой застройкой односторонней улицы стояли бани. Эта протяженная улица была связана с верхним плато и нижней подгорной частью города деревянными лестницами. К северо-востоку от мечети на обрыве находилась парадная каменная лестница, связывавшая центр города с этой улицей и нижней частью Булгара. Лестница выводила к средней бане, которая располагалась на оси с Соборной мечетью. По цвету внутренних стен она была названа археологами «Красной палатой». Это была наиболее крупная (30×24 м) и хорошо оформленная в интерьере баня для состоятельной части населения города. Перед её восточным фасадом была устроена мощеная плитами белого камня площадь с фонтаном. Южной стороной баня примыкала к склону. А вдоль западного фасада был устроен приямок истопника, стены которого были облицованы белым камнем. Печь топили с улицы.

Во время раскопок бани в 1939 г. выявлено большое количество обломков плоского оконного стекла диаметром 20-25 см, вставлявшегося в алебастровые рамы [14]. Подобный фрагмент рамы до настоящего времени сохранился в окне северной стены Чёрной палаты. Стёкла «Красной палаты» могли быть вставлены, как в круглые отверстия полусферического купола на парусах, перекрывавшего центр главного моечного зала бани, так и в рамы окна предбанника. Это говорит о нерядовом характере бани. Изучение материалов археологических раскопок «Красной палаты», тщательный и научно обоснованный подбор аналогов позволил выполнить реконструкцию ее архитектурного облика и планировочной структуры. Важность этой работы заключается в том, что реконструкция позволяет, хотя и с небольшими допущениями, создать вполне достоверный облик давно утраченного объекта (рис. 3-5).

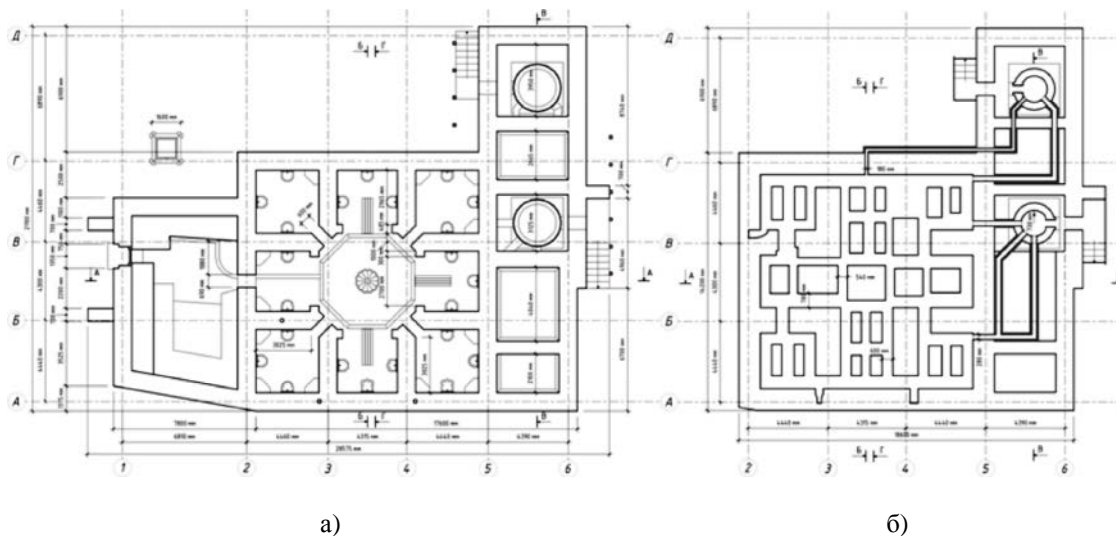


Рис. 3. Баня-хаммам «Красная палата», г. Булгар, XIV в.  
 Реконструкция Надыровой Х.Г., Кручинина В.А.:  
 а) план 1-го этажа, б) план с печами и подпольными каналами отопления



Рис. 4. Баня-хаммам «Красная палата», г. Булгар, XIV в.  
 Реконструкция Надыровой Х.Г., Кручинина В.А.. Общий вид бани с северо-запада

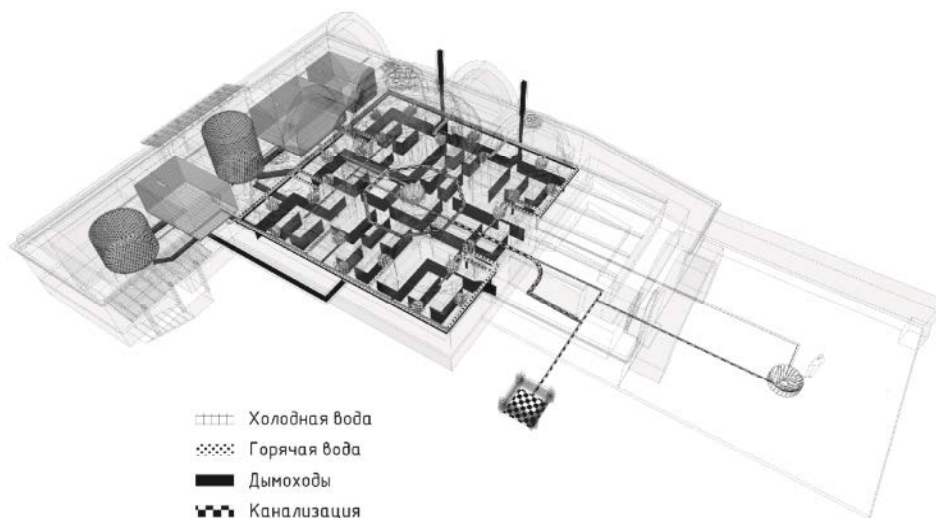


Рис. 5. Баня-хаммам «Красная палата», Булгар, XIV в. Общий вид инженерной системы.  
 Реконструкция Кручинина В.А., Надыровой Х.Г.

Инженерная система бани-хаммам «Красная палата» включала систему отопления (печи, подпольные каналы отопления, вытяжные трубы), систему горячего и холодного водоснабжения (водопровод, цистерны с горячей и холодной водой, водоразводную систему с кранами над мраморными и каменными чашами), систему водоотведения (лотки, канализационные трубы, водоотстойный колодец)

В «Красной палате» выявляется еще одна особенность бань-хаммамов региона: устройство двух отопительных печей с цистернами для нагрева воды. В холодное время года могли использовать обе печи одновременно. К топке каждой печи вели спуски с западной и восточной стороны под навесами на деревянных столбах. Южным фасадом баня врезалась в крутой склон, поэтому предбанник имеет неправильную конфигурацию. Вход в баню на западном фасаде был акцентирован высокой и широкой стрельчатой аркой. Высота центрального зала до зенита купола составляла чуть более 7 метров. Угловые залы, в которые вели низкие арочные проемы шириной около 60 см, перекрывались куполами меньших размеров. Осевые помещения крестового зала перекрывались цилиндрическими сводами.

К настоящему времени в Болгарском городище выявлены остатки 6 бань, которые представляли собой здания зально-ячеистой структуры [15, с. 220-221; 16, с.108-109].

При строительстве монументальных сооружений в Булгаре использовались специальные строительные приемы. Для укрепления грунта под фундамент вбивались деревянные сваи-коротыши диаметром 8-20 см и длиной 45-80 см с острым концом. Затем выполнялась известково-песчаная подсыпка, выравнивавшая основание под первым рядом кладки фундамента [17; 18, с. 8.]. Особенно наглядно этот прием проявился в заречной слободе Булгара под стенами бани № 3. Для укрепления сыпучего грунта под стены бани также были вбиты деревянные сваи [5, с. 415].

Анализ библиографических и археологических материалов позволил провести реконструкцию объемов бань-хаммам города Булгар и установить, что строители бань-хаммамов Булгарского улуса (1240-1430-е гг.) не только унаследовали традиции болгарской архитектуры общественных бань, но и развили их.

После распада Золотой Орды на месте северной части Булгарского улуса образовалось Казанское ханство, столицей которого стал город Казань. От ханского периода не сохранились здания бань. Однако в русских исторических источниках есть о них упоминания. Общественная Даирова (Тагирова) баня Казани упоминалась в летописи при описании штурма города войсками Ивана IV в 1552 году [19, с. 41]. Она располагалась на берегу реки Казанка вблизи устья Булака под городской стеной. Судя по реконструкции Даировой бани историком Н.И. Калининым, опиравшимся на неизвестные материалы, это было каменное одноэтажное здание с многокупольным покрытием [20, рис. 8]. По некоторым историческим сведениям, баня сохранялась и функционировала до конца XVII века. Помимо Тагировой, упоминаются каменные бани на протоке Булак, на Поганом озере вблизи Елбугиных (Воскресенских) ворот, а также бани на берегах озер Черноозерской впадины [21, с. 144]. В исторических источниках упоминаются бани «Айдар» и «Алтын» [22, с. 54; с. 111, рис. 19]. До времени строительства каменных бань в городах Казанского ханства, эта традиция существовала в регионе уже около 600 лет.

Сравнительный анализ объемно-планировочных решений бань-хаммам различных регионов мусульманского Востока позволил выявить особенности сооружений Волжско-Камского региона. На протяжении столетий бани-хаммамы в городах Волго-Камья по объемно-планировочным решениям и архитектурно-декоративному оформлению во многом были аналогичны среднеазиатским и крымским баням и имели зально-ячеистую структуру и купольно-сводчатые покрытия. В отличие от бань Ближнего Востока и Малой Азии они были более лаконичны по планировке и архитектуре. Обладая общими типологическими чертами с подобными сооружениями стран мусульманского Востока, баня-хаммам Волжско-Камского региона обладала своими особенностями, обусловленными, в первую очередь, резко континентальным климатом с сезонными проявлениями. Наличие тамбуров, помещений истопников, устройство нескольких печей было вызвано необходимостью защиты от холодов. Пышное архитектурно-декоративное оформление не было характерно для бань нашего региона. Штампованный декор по водозащитной штукатурке и покраска стен в

интерьере, мраморные лавки и резные чаши под водоразборными латунными кранами составляли убранство интерьеров бань. Фасады облицовывались шлифованными белокаменными плитками. Резной декор мог украшать нишу входа.

### **Выводы**

Таким образом, в средневековый период развития с X до середины XVI вв. в регионе сложилась и развивалась традиция возведения в городах бань-хаммам, как неперенного атрибута мусульманского образа жизни. Эта традиция сложилась в регионе Волго-Камья под влиянием градостроительства и архитектуры стран мусульманского Востока. С включением Казанского ханства в состав Русского государства, татарское население было выселено из городов в пригородные слободы. Татарские правители и знать были изгнаны или лишены своего статуса. Поскольку каменные бани в средневековых мусульманских государствах возводили, как правило, по заказу и на средства правителей и знати, то с середины XVI века в Волго-Камье были утрачены социально-экономические и политические основы возведения этого типа общественных зданий. Традиция строительства бань-хаммам в Волжско-Камском регионе прервалась.

В результате исследования установлены: 1. Не исследованность данной проблемы в историко-архитектурной науке; 2. Непрерывность в распространении и развитии бань-хаммам в Волго-Камье на протяжении шести с половиной столетий, что способствовало сложению традиций в строительстве этого типа сооружений в регионе; 3. В истории мировой средневековой архитектуры мусульманских стран ареал распространения этого типа зданий включал и самый северный по расположению регион Волго-Камья. 4. Природно-климатические отличия региона от традиционного ареала распространения бани-хаммам в восточно-мусульманских странах обусловили появление особенностей в объемно-планировочных решениях: традиционная схема при функциональном минимуме помещений, устройство тамбуров и дополнительных печей, защита сводчато-купольных покрытий зданий от холода и атмосферных осадков путем их утолщения, устройства земляных настилов и деревянных крыш; в строительно-технических решениях: уплотнение грунта деревянными сваями под фундаментами, использование обожженного кирпича в конструктивно важных местах этого типа зданий. 5. Выявленные традиции строительства и особенности архитектуры бани-хаммам Волжско-Камского региона позволяют возродить этот тип общественных зданий в городах и поселениях Татарстана на современной основе.

Однако результаты изучения данной темы имеют и практическое применение. Культура бани-хаммам может возродиться в новых условиях современности. Наряду с возрождением и развитием мусульманской монументальной культовой архитектуры, возможно возрождение архитектурного типа бани-хаммам. Серьезные научные исследования в этом плане проводятся за рубежом, где ставится задача ревитализации хаммамов с учетом экологических, экономических, социально-культурных, историко-архитектурных и управленческих аспектов [23]. Возрождение исторического типа бань-хаммам будет способствовать приданию самобытного облика городам и поселениям нашей республики.

### **Список библиографических ссылок**

1. Воронина В. Л. Бани-хаммам у народов Советского Союза и стран зарубежного Востока // Архитектурное наследие. М., 1983. № 31. С. 133–167.
2. Воронина В. Л. Средневековый город арабских стран. М. : ВНИИТАГ, 1991. 103 с.
3. Зиливинская Э. Д. Бани Золотой Орды // Практика и теория археологических исследований. Ред. А. П. Смирнов. М. 2001. С. 174–226.
4. Стародуб-Еникеева Т. Хаммам – горячие бани мусульманского средневековья URL: <http://www.islam.ru/content/kultura/31112> (дата обращения: 09.07.2016).
5. Хованская О. С. Бани города Болгара // МИА. № 42. Труды Куйбышевской археологической экспедиции. Т 1. М., 1954. С. 392–423.
6. Хованская О. С. Водоснабжение и канализация болгарской бани // КСИИМК. М., 1953. Вып. 50. С. 69–76.



7. Егерев В. В. Архитектура г. Болгара // Материалы и исследования по археологии СССР. 1958. № 61. С. 360–394.
8. Айдаров С. С. Исследование и реставрация памятников монументального зодчества Болгара // Город Болгар. Монументальное строительство, архитектура, благоустройство. М. : Наука, 2001. С. 5–149.
9. Хузин Ф. Ш. Булгарский город в X-начале XIII вв. Казань, 2001. 480 с.
10. George Michl. Architecture of the Islamic World – Its History and Social Meaning. 1978, Thames&Hudson Ltd. London, Pp. 290. Reprinted 2011. URL: <https://archive.org/stream/01isart#page/n5/mode/2up>. Jul 29, 2014 (дата обращения: 19.10.2017).
11. Bathhouses (The article W. Floor, W. Kleiss from Encyclopedia Iranica. Vol. III, Fasc. 8, P. 863–869). URL: <http://www.iranicaonline.org/articles/bathhouses#pt1>. 2017. (дата обращения: 19.10.2017).
12. Rabah Saoud. Muslim Architecture under Ottoman Patronage (1326-1924). (Chief Editor: L. Ball). 2004. 26 p. URL: <http://www.muslimheritage.com/uploads/OttomanArchitecture.pdf>. (дата обращения: 19.10.2017).
13. Tell Tuneinir Syria. URL: <http://users.stlcc.edu/mfuller/tuneinir/> (дата обращения: 12.11.2016).
14. Смирнов А. П. Краткий отчёт о работе Болгарской экспедиции Государственного исторического музея за 1939 г. БГИАЗ, док. фонд, № 23-1.
15. Шарифуллин Р.Ф. Бани Болгара и их изучение // Город Болгар. Монументальное строительство, архитектура, благоустройство. М. : Наука, 2001. С. 217–260.
16. НадYROVA X. Г. Градостроительная культура татарского народа и его предков. Казань, 2012. 294 с.
17. Полубояринова М. Д. Раскоп ХCV // Отчёт о раскопках на Болгарском городище в 1988 г. БГИАЗ, док. фонд, № 550-1/92. 1989. С. 93–148.
18. Шарифуллин Р. Ф. Отчёт о работах... на раскопе СII // Отчёт о раскопках на Болгарском городище в 1988 г. БГИАЗ, док. фонд, № 550-1/92. 1989. С. 5–52.
19. История Казани в Никоновской летописи // Древняя Казань глазами современников и историков. Казань: Фест, 1996. С. 18–50.
20. Калинин Н. Ф. Казань. Исторический очерк. Казань : Таткнигоиздат 1955. 322 с
21. Из «Писцовых книг города Казани 1565-1568 годов» // Древняя Казань глазами современников и историков. Казань : Фест, 1996. С. 139–151.
22. Айдарова Г. Н. Архитектурно-градостроительное развитие Казани X-XVI вв.: эволюция, традиции, влияния. Казань, 2012. 150 с.
23. Heidi Dumreicher. The Hammam: Scenarios for a Sustainable Future // Cultural heritage and development in the Arab world / editors, Fekri Hassan, Aloisia de Trafford, Mohsen Youssef ; foreword Ismail Serageldin. Alexandria, Egypt: Bibliotheca Alexandrina, 2008. 316 p. URL: [http://www.bibalex.org/arf/en/gra1106\\_df\\_20081102\\_book.pdf.229-242](http://www.bibalex.org/arf/en/gra1106_df_20081102_book.pdf.229-242) (дата обращения: 19.10.2017).

**Nadyrova Kh.G.** – doctor of architecture, associate professor

E-mail: [nadyrova-kh@yandex.ru](mailto:nadyrova-kh@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Public baths-hammam in the medieval cities of Volga-Kama: the formation of traditions and peculiarity of the architecture**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to explore the formation of tradition in the construction of baths-hammam, and to identify the features of their architecture in the medieval cities of the Volga-Kama region. In the vast bibliographic and full-scale material examines the development of stone public baths for over six and a half centuries during the periods of existence in the region of several medieval Muslim States.

*Results.* The main results of the study are that the existence of a continuous tradition of building public baths-hammam in the Volga-Kama region of Eastern Europe for over six centuries. Common in Muslim countries type of bath-hammam in the cities of Volga-Kama acquired space planning and construction and technical features.

*Conclusions.* The historical and scientific significance of the results lies in the fact that you have: 1. Not the research into the problem of historical and architectural science; 2. Continuity in the dissemination and development of baths-hamams in the Volga-Kama region for six and a half centuries, which contributed to the addition of traditions with the construction of this type of structures in the region; 3. In the history of medieval architecture of Muslim countries, the distribution of this type of buildings includes the most northerly location of the region of Volga-Kama. 4. The climatic differences of the region from the traditional distribution area of the baths-hammam in the Eastern Muslim countries has led to the emergence of features in the architectural and planning solutions of this type of buildings: traditional scheme with a minimum of areas of functional purpose, the construction of the vestibule and additional stoves, protection of vaulted-domed roof of the building from cold and precipitation by their thickening, the construction of decks and wooden roofs. 5. Identified building traditions and the architectural features of the baths-hammam of the Volga-Kama region allows to revive this type of public buildings in cities and settlements of Tatarstan.

**Keywords:** architecture, tradition, bath-hammam, space-planning decision, reconstruction, middle ages, Islam.

### References

1. Voronina V. L. Baths-hammam of the peoples of the Soviet Union and the countries of foreign East // *Arkhitekturnoye nasledstvo*. M., 1983. № 31. P. 133–167.
2. Voronina V. L. The Medieval city of the Arab countries. M. : VNIITAG, 1991. 103 p.
3. Zilivinskaya E. D. Bath of the Golden Horde // *Praktika i teoriya arkhelogicheskikh issledovaniy*. Ed. A. S. Smirnov. M., 2001. P. 174–226.
4. Starodub-Enikeeva T. Hammam – hot baths of the Muslim middle ages. URL: <http://www.islam.ru/content/kultura/31112/> (reference date: 09.07.2016).
5. Khovanskaya O. S. Baths of the city of Bolgar // *MIA*. № 42. Proceedings of the Kuibyshev archaeological expedition. T 1. M., 1954. P. 392–423.
6. Khovanskaya O. S. Water supply and the sewerage system of the Bulgarian bath // *XIIM*. M., 1953. Vol. 50. P. 69–76.
7. Yegerev V. V. Architecture of the city of Bolgar // *Materials and researches on archeology of the USSR*. 1958. № 61. P. 360–394.
8. Aydarov S. S. Study and restoration of monuments of monumental architecture of Bolgar // *City of Bolgar. Monumental construction, architecture, landscaping*. M. : Nauka, 2001. P. 5–149.
9. Khuzin F. Sh. The Bulgarian town in the X-beginning of XIII centuries. Kazan, 2001. 480 p.
10. George Michl. *Architecture of the Islamic World - Its History and Social Meaning*. 1978, Thames & Hudson Ltd. London, P. 290. Reprinted 2011. URL: <https://archive.org/stream/01isart#page/n5/mode/2up>. Jul 29, 2014 (reference date: 19.10.2017).
11. Bathhouses (The article W. Floor, W. Kleiss from *Encyclopedia Iranica*. Vol. III, Fasc. 8, P. 863–869). URL: <http://www.iranicaonline.org/articles/bathhouses#pt1>. 017. (reference date: 19.10.2017).
12. Rabah Saoud. *Muslim Architecture under Ottoman Patronage (1326-1924)*. (Chief Editor: L. Ball). 2004. URL: <http://www.muslimheritage.com/uploads/OttomanArchitecture.pdf> (reference date: 19.10.2017).
13. Tell Tuneinir Syria. URL: <http://users.stlcc.edu/mfuller/tuneinir/> (reference date: 12.11.2016).
14. Smirnov A. P. Brief report on the work of the Bulgarian expedition of the State historical Museum in 1939 – BGEAS, Doc. Fund, № 23-1.

15. Sharifullin R. F. Baths of Bolgar and their study // *Gorod Bolgar. Monumental'noye stroitel'stvo, arkhitektura, blagoustroystvo*. М. : Nauka, 2001. P. 217–260.
16. Nadyrova H. G. Town-planning culture of the Tatar people and its ancestors. Kazan, 2012. 294 p.
17. Poluboyarinova M. D. Excavation XCV // *Report of the excavations in the Bulgarian settlement in 1988. BGEAS. Doc. Fund, № 550. 1/92. 1989. P. 93–148.*
18. Sharifullin R. F. The report on the work... on the excavation CII // *Report of the excavations in the Bulgarian settlement in 1988. BGEAS. Doc. Fund, № 550. 1/92. 1989. P. 5–52.*
19. The history of Kazan in the Nikon chronicle // *Drevnyaya Kazan' glazami sovremennikov i istorikov*. Kazan : Fest, 1996. P. 18–50.
20. Kalinin N. F. Kazan. Historical sketch. Kazan : Tatknigoizdat 1955. 322 p.
21. From «Cadastres of Kazan of 1565-1568 years» // *Drevnyaya Kazan' glazami sovremennikov i istorikov*. Kazan : Fest, 1996. P. 139–151.
22. Aidarova G. N. Architectural and urban development of Kazan X-XVI centuries: evolution, tradition, influence. Kazan. 2012. 150 p.
23. Heidi Dumreicher. The Hammam: Scenarios for a Sustainable Future // *Cultural heritage and development in the Arab world / editors, Fekri Hassan, Aloisia de Trafford, Mohsen Youssef; foreword Ismail Serageldin*. Alexandria, Egypt: Bibliotheca Alexandrina, 2008. 316 p. URL: [http://www.bibalex.org/arf/en/gra1106\\_df\\_20081102\\_book.pdf](http://www.bibalex.org/arf/en/gra1106_df_20081102_book.pdf). P. 229–242 (reference date: 19.10.2017).

УДК 72.035.1

**Попов А.О.** – кандидат технических наук

E-mail: [a.o.popov@yandex.ru](mailto:a.o.popov@yandex.ru)

**Матвеев И.Ю.** – кандидат экономических наук, доцент

E-mail: [matigur@mail.ru](mailto:matigur@mail.ru)

**Бирюлева Д.К.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [dila899@mail.ru](mailto:dila899@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Меншиков бастион Петропавловской крепости г. Санкт-Петербург. Фрагменты изначального строения**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью настоящей работы является демонстрация широкой общественности сохранившихся элементов деревоземляного бастиона возведенного в 1703 г. по указу Петра I, который без малого 300 лет был скрыт существующими ныне стенами Петропавловской крепости. Информация о конструктивном решении изначального деревоземляного бастиона была противоречивой [1, 2], и указывалось, что ныне существующая крепость повторяет по форме предшествующую, а строительство в камне началось непосредственно после окончания возведения деревоземляного бастиона [3-4].

*Результаты.* В рамках проведения первоочередных противоаварийных мероприятий работ были вскрыты фрагменты деревоземляного бастиона и его фундамента, была выявлена конструктивная схема основных несущих и ограждающих конструкций, в том числе и фундаментов.

*Выводы.* Значимость работы для архитектуры заключается в том, что авторами приводятся ранее не известные графические материалы и фотографии, полученные при проведении инженерно-технического и историко-культурного исследования [5, 6], раскрываются ранее неизвестные факты о существующих архитектурно-строительных элементах.

**Ключевые слова:** памятники истории и культуры, инженерная реставрация, реконструкция, усиление.

В административном отношении Меншиков бастион находится в Петроградском районе г. Санкт-Петербург в северо-восточной части Заячьего острова в пределах Приморской низменности и приурочена к правобережью р. Нева.

Основные даты и знаковые события, связанные с Меншиковым бастионом приняты на основании [1, 2], согласно которым сооружение заложено в 1703 г. по указу Петра I и первоначально устроено в деревоземляном исполнении. Перестройка в камне бастиона была начата с закладки левого фланка в 1706 г. (арх. Трезини). В 1708 г. левый фланк получил дополнительно полукруглый орильон выступающий за его линию, позволявший вести огонь вдоль фланка. В это же время шпиг бастиона был засыпан грунтом, а в более позднее время были устроены три каземата внутри шпица 1830 г. Строительство каменных фасадов и правого фланка завершено к 1729 г. К шпицу бастиона в 1725 г. пристроена каменная аппарель по проекту В. Свиягина, которая до этого времени была деревянной. В 1952 г. аппарель перестроена по проекту П. Симятина. Работы по перелицовке брустверных стен проводились в 1830 году, в рамках которых открытые бойницы были заложены. В это же время были перестроены казематы правого фланка, ставшие с этого времени одноэтажными. В 1837 году у эскарповых стен устроены барбетты для орудий, а амбразуры переделаны в один ярус.

С 1965 по 1966 год в рамках проведения реставрационных работ, по проекту И.Н. Бенуа [7] проведена реставрация фасадов эскарповых стен, устроена гидроизоляция шпица по земляной отсыпке и железобетонная монолитная плита, которая являлась прогулочной площадкой, кроме того был выполнен водоотвод с покрытия шпица. В 2007 году по проекту [8] проведена реставрация эскарповых стен и фасадов. С 2010-2011 гг., по проекту НПО «Ранд» [9], выполнялись работы по реставрации фасадов валганговых стен и стен аппарели, кроме того проведены работы по благоустройству горжи.

Меншиков бастион – представляет собой мощный, не равносторонний в плане, клин, шпиг которого обращен на северо-восточную часть Кронверкского пролива. Бастион находится в общем архитектурном ансамбле фортификационных сооружений Петропавловской крепости, состоящих из шести бастионов и соединяющих их куртин. К Меншикову бастиону с юго-востока примыкает Петровская, а с северо-запада Кронверкская куртины (рис. 1).



Рис. 1. Панорама Петропавловской крепости с воздуха [10]

Фасады бастиона устроены без особых архитектурных изысков, минимализм архитектурных форм не удивителен для фортификационного сооружения, коим Петропавловская крепость, в том числе и Меншиков бастион, являлась вплоть до 1960 г., когда и была передана в ведение Государственного музея истории города. Тем не менее, фасады эскарповых стен украшены декоративным пояском и карнизом из известковых камней, а внутренние и внешние углы бастиона сложены из тесаных камней. Валганговые стены имеют лишь декоративный карниз. Аппарель украшена декоративными парапетными плитами и круглыми в плане тумбами, устроенными из тесаных камней. Фотографии по вышеописанным фасадам и элементам находятся в открытом доступе, поэтому в рамках настоящей работы не приводятся.

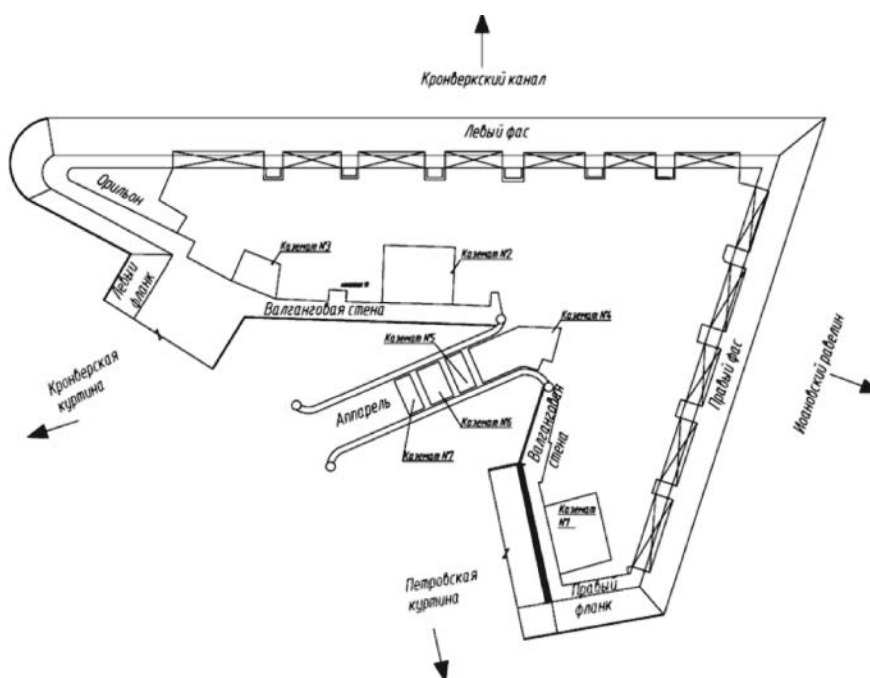


Рис. 2. Схематичный план Меншикова бастиона,  
построенный по результатам обмеров проведенных авторами [5]

В конструктивном отношении бастион представляет собой каменный люнет (рис. 2) с двумя фасадами, двумя фланками и открытой горжей, со стороны которой устроена аппарель. Бастион имеет два ряда стен – наружную (эскарповую) и внутреннюю (валганговую), пространство между которыми на момент проведения исследования частично засыпано грунтом (рис. 3).

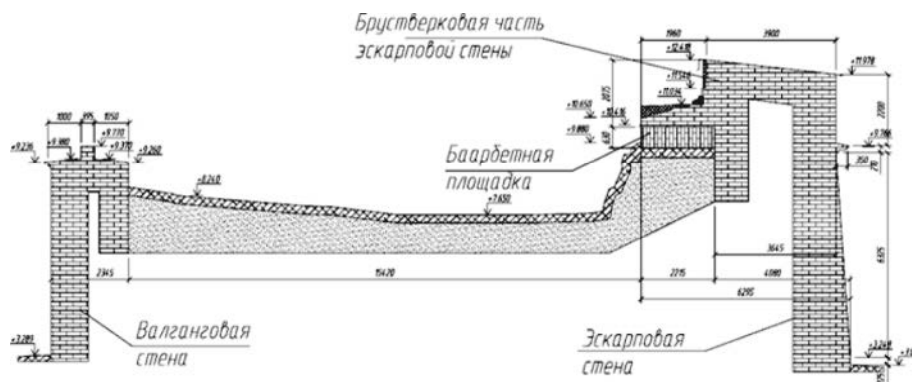




Рис. 5. Каменный контрфорс и опирающиеся на него арки барбетных площадок [5]

В пределах Меншикова бастиона располагаются три каземата, имеющие разные конфигурации и конструктивные решения. Так первый каземат, изначально пороховой «погреб», прямоугольное в плане помещение, примыкающее к валганговой стене, в южной части бастиона, перекрытие которого устроено в виде зеркального свода переменной толщины от 0,38 м в плафоне до 0,78 м в опорной части. Плафон в центральной части свода является поздним элементом, а изначально на его месте располагалось отверстие для подъема пороха из каземата. Стены казематов выполнены толщиной от 1,65 до 1,89 м. Второй каземат также примыкает к валганговой стене, является прямоугольным в плане, располагается в центральной части бастиона. Перекрытие каземата устроено в виде сомкнутого свода переменной толщины от 0,38 м в замке до 0,78 м в опорной части, в стрелке которого устроено вентиляционное отверстие. Третий каземат на момент проведения обследования замурован, в связи, с чем конструкции его не известны. Доподлинно установлено, что стены третьего каземата кирпичные на известковом растворе.

Аппарель Меншикова бастиона достаточно пологая и имеет длину порядка 30,0 м, ширина аппарели с учетом кирпичных парапетов 6,95 м (рис. 6). Внутри аппарели устроены четыре каземата различной высоты от 2,0 м до 2,9 м, высота перекрытия казематов увеличивается по мере приближения к шпигу бастиона. Перекрытия казематов, расположенных в пределах аппарели, устроены в виде цилиндрических сводов с распалубками.

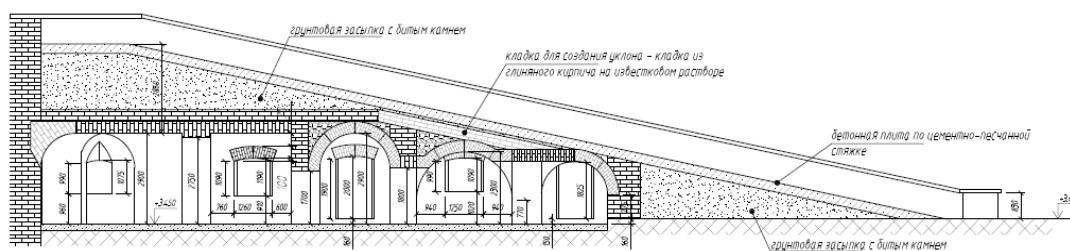


Рис. 6. Схематичный разрез по аппарели Меншикова бастиона, построенный по результатам обмеров проведенных авторами [4]

Стены выполнены из полнотелого глиняного кирпича на известковом растворе, оштукатуренные с внешних сторон декоративной известковой штукатуркой с расшивкой имитирующей кирпичную кладку. С внутренней стороны, стены казематов аппарели оштукатурены.

При проведении ремонтно-реставрационных работ осенью 2017 г. были обнаружены фрагменты несущего остова деревоземляного бастиона (рис. 7, 8).



Рис. 7. Фрагмент несущего остова деревоземляного бастиона (строительство 1703 г.)



Рис. 8. Фрагмент фундамента деревоземляного бастиона (строительство 1703 г.)

Авторы настоящей работы считают, что, сохранившиеся по настоящее время, руинированные фрагменты изначального деревоземляного бастиона необходимо сохранить и включить их в экспозицию музея истории города Санкт-Петербург.

Сохранившиеся фрагменты изначального строения Меншикова бастиона позволяют в достаточной мере точно определить конструктивную схему несущего остова, которая позволит, используя методологию, предложенную Х.Г. Надыровой [11], воссоздать внешний облик, изначально возведенной, Петропавловской крепости.

#### Список библиографических ссылок

1. Летопись Петропавловской крепости. Том 1. СПб. : Турусел, 2008. 227 с.
2. Летопись Петропавловской крепости. Том 2. СПб. : Турусел, 2008. 142 с.
3. Архивные материалы администрации музея «Петропавловской крепости» г. Санкт-Петербург.



4. Архивные материалы «Комитета по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры» (КГИОП) г. Санкт-Петербург.
5. Попов А. О., Матвеев И. Ю., Бирюлева Д. К. и др. Отчёт по НИР. Инв. № 370/14-А/СМ. Отчет об обследовании технического состояния строительных конструкций Меншикова бастиона Петропавловской крепости / LTD СТСС «ЭкспертПроектСтрой». Казань, 2015.
6. Попов А. О., Матвеев И. Ю., Бирюлева Д. К. Меншиков бастион Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге. Архитектурно-строительная часть летописи // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 54–58.
7. Проектная документация на реставрацию Меншикова Бастиона Петропавловской крепости / Проектный институт «Ленпроектреставрация». Л., 1960.
8. Проект реставрации эскарповой стены левого фаса Меншикова бастиона. Раздел 1. Том 2 / ОАО НИИ «Спецпроектреставрация». Л., 1986.
9. Отчет по НИР. Раздел 1. Книга 4. Часть 2. Научно-исследовательские работы. Отчет о техническом обследовании конструкций аппарели и шпица Меншикова бастиона. Обмерочные чертежи / ЗАО НПО «РАНД». СПб., 2010.
10. Панорама Петропавловской крепости с воздуха // maps.yandex.ru (дата обращения: 01.04.2015).
11. Надьрова Х. Г. Современный подход к преподаванию историко-архитектурных дисциплин // Дизайн-ревью. 2014. № 1. С. 68–73.

**Popov A.O.** – candidate of technical sciences

E-mail: [a.o.popov@yandex.ru](mailto:a.o.popov@yandex.ru)

**Matveev I.Y.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [matigur@mail.ru](mailto:matigur@mail.ru)

**Biryuleva D.K.** – candidate of chemical sciences, associate professor

E-mail: [dila899@mail.ru](mailto:dila899@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Menshikov's Bastion of the Peter and Paul fortress in St. Petersburg. Fragments of the original structure**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of this work is to demonstrate the wider public-preserved wooden elements of the bastion was erected in 1703 by decree of Peter I, which for nearly 300 years was hidden now by the existing walls of the fortress. Information about the constructive solution of the original wooden Bastion were contradictory, and noted that the existing fortress repeats the shape prior, and the construction in stone began immediately after the erection of the wooden Bastion.

*Results.* In the framework of the restoration were revealed fragments of a wooden bastion, and its foundation were identified structural diagram of the key load-bearing and enclosing structures, including foundations.

*Conclusions.* The significance of the work lies in the fact that the authors are previously unknown graphic materials and pictures obtained during the engineering and historical-cultural studies [5, 6], reveals previously unknown facts about the existing architectural elements.

**Keywords:** historical and cultural monuments, engineering restoration, reconstruction, structural solutions.

#### **References**

1. The annals of the fortress. Volume 1. SPb.: Turpel, 2008. 227 p.
2. The annals of the fortress. Volume 2. SPb.: Turpel, 2008. 142 p.
3. Archival materials of the administration of the Museum «Peter and Paul fortress» in Saint-Petersburg.

4. Archival materials of the « Committee for state control, use and protection of monuments of history and culture» (KGIOP) SPb.
5. Popov A. O., Matveev I. Yu., Biryuleva D. K. Report on research work. Inv. № 370/14-A/CM. A report on the inspection of a technical condition of building structures Menshikov Bastion of the Peter and Paul fortress / ООО ZTS «EkspertProyektStroy». Kazan, 2015.
6. Popov A. O., Matveev I. Yu., Biryuleva D. K. Menshikov Bastion of the Peter and Paul fortress in Saint-Petersburg. Architectural and construction part of the chronicle // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2015. № 3 (50). P. 54–58.
7. Project documentation for restoration of Menshikov Bastion of the Peter and Paul fortress // Design Institute «Lenproektrestavratsia». L., 1960.
8. The restoration project of the scarp wall of the left front of the Menshikov's Bastion. Section 1. Vol. 2 // OJSC research Institute memorials «Spetsproektrestavratsiya». L., 1986.
9. Scientific research reports. Section 1. Book 4. Part 2. Scientific research work. Report on the technical examination of the structures of the ramp and Spitz Menshikov Bastion. Creation of working drawings // JSC NPO «RAND». SPb., 2010.
10. Panorama of Peter and Paul fortress from the air // maps.yandex.ru (reference date: 01.04.2015).
11. Nadyrova Kh. G. A Modern approach to the teaching of historical and architectural subjects // Dizain-revyu. 2014. № 1. P. 68–73.

УДК 7201

**Фахрутдинова И.А.** – кандидат архитектуры, доцент

E-mail: [fahinessa@mail.ru](mailto:fahinessa@mail.ru)

**Ефимов Д.Д.** – аспирант

E-mail: [daniel.efimoff@gmail.com](mailto:daniel.efimoff@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Средовой подход в региональной архитектуре советского модернизма 1970-1980 гг.  
в проектировании Выставочного зала Союза Художников ТАССР в г. Казани,  
архитекторы: Г.А. Бакулин (руководитель авторского коллектива),  
Р.Х. Галеев, В.П. Мулюкин**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить и обобщить факты, относящиеся к средовому подходу и адресному проектированию, на примере проекта Выставочного зала Союза Художников ТАССР.

*Результаты.* В ходе исследования выявлено:

- Принципы средового подхода формулировались теоретиками отечественной архитектуры в 70-80-е гг., параллельно со схожим западным стилистическим течением «контекстуализма», и повлияли на проектирование объектов модернистской архитектуры конца XX века.

- Анализ проекта Выставочного зала Союза Художников ТАССР, разработанный архитектором Г.А. Бакулиным на основе средового подхода, выявил основные аспекты метода средового проектирования по ключевым позициям: учет культурно-исторического аспекта, интеграция в историческую застройку, композиционная, масштабная, пластическая структура здания и др.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в выявлении методологических аспектов средового подхода, которые могут быть использованы в проектно-архитектурной практике сегодняшнего дня. Разбор проекта Выставочного зала Союза Художников ТАССР приращивает знания об истории и ценности региональной архитектуры.

**Ключевые слова:** архитектурно-историческая среда, культурно-исторический контекст, градостроительная ситуация, контекстуализм, средовой подход, адресное проектирование, региональная архитектура периода советского модернизма.

Статья посвящена проблеме проектирования модернистских объектов периода 1970-1980-х гг. в аспекте их интеграции в архитектурно-историческую среду города и становления «средового подхода» в архитектуре данного периода в г. Казани.

В современных условиях комплексной и глобальной застройки особенно актуальной становится проблема встраивания объекта в существующую городскую среду и в пространство ее культурно-исторического контекста. Авторам проекта или специалистам, отвечающим за сохранение исторической среды на основе специальной регламентирующей документации, сегодня вменяется умение формулировать дополнительные средовые критерии, при которых выполняемый проект не нарушал бы, а только дополнял и гармонично развивал ту среду, в которую внедряется. Однако, эта проблема и связанные с ней требования к архитектурному проектированию не новы и имеют определяющее влияние на формирование истории архитектуры конца XX-начала XXI веков и появление таких ключевых понятий как «историческая среда» и «культурный контекст» – ключевые понятий, определяющие суть «архитектурного манифеста» последней четверти XX века.

Вместе с пониманием гармонизирующей роли архитектуры в процессе созидания непрерывного культурно-исторического контекста при проектировании городских пространств в отечественную архитектурную практику в конце 70-х годов XX века пришел метод в профессиональном обиходе получивший название «Средовой подход». В

момент его формулирования методом «средового подхода» в архитектуре было принято называть подход к проектированию, в рамках которого решающее или приоритетное значение уделяется факторам пространственного окружения – его формообразующим характеристикам и культурно-историческому подтексту. Понятие «средового подхода» нередко встречается и в нормативно-правовых документах, регулирующих архитектурную деятельность. Однако, привычный для профессиональных архитекторов контекст употребления «средовых» понятий в современной проектной практике постепенно начинает меняться, все чаще, архитекторы обращаются к размышлениям о необходимости использования «средового подхода» в поисках новых архитектурно-проектных средств естественного, эволюционного развития городов с исторически сложившейся структурой и обликом. В связи с этим, представляет интерес разбор сути метода, истории его становления и влияния на проектную практику, а также сопоставимость «средового подхода» с его западным аналогом – «контекстуализмом», имевший схожее влияние на развитие подхода гармонизации архитектурных решений в формировании городов Европы, а позднее и России.

История зарождения средового подхода в России связана с индустриализацией и унификацией архитектурных форм послевоенного модернизма. Ускоренное восстановление экономики жилого сектора и инфраструктуры привело к массовому строительству однообразных жилых микрорайонов и даже целых городов. Возникновение рассматриваемого метода стало реакцией отторжения безликости и однообразия унифицированных форм архитектурного пространства. Первоначально понятие «средового подхода» существовало лишь в области архитектурной теории, как осознание необходимости учета визуального и эмоционального взаимовлияния вновь возводимых в исторической части города объектов с окружающей их застройкой.

Признание архитектурно-исторической среды, после Второй мировой войны, в качестве комплексного памятника человеческой цивилизации и культуры стало причиной появления новых направлений в теории и практике реконструкции и реставрации архитектурного наследия. Активная архитектурно-градостроительная деятельность без учета особенностей исторически сложившегося пространства городской среды, как следствие острой необходимостью послевоенного восстановления, вызывала все больше критики, как со стороны профессионального сообщества, так и со стороны широкой общественности. Эти и другие объективные обстоятельства стали причиной появления новых концепций, прикладных моделей и международных Хартий, например, таких как Венецианская Хартия 1964-го года. В их задачи входило выявление и корректировка недостатков, новые парадигмы в постановке теоретических проблем и выработка новых направлений развития архитектуры. Одной из важнейших идей этих мероприятий стало положение о контексте места («духе места»), вызванное необходимостью гармоничного включения новых объектов в существующую архитектурно-пространственную среду.

Зарождение «эпохи средового подхода» многие исследователи связывают со временем сноса крупных модернистских комплексов, построенных в послевоенный период. Так, например, Чарльз Дженкс, основной теоретик постмодернизма в архитектуре, назвал 1972 год датой конца модернизма, связывая ее с разрушением жилого комплекса в Прюит-Игоу [1]. Советская архитектура, отказавшись от «украшательства» первого послевоенного десятилетия, стала воспринимать рационалистические архитектурные формы, развитые теоретиками функционализма на Западе и признанные во всем мире как «интернациональный» стиль. Это привело к появлению безликих стандартных районов, в дальнейшем получивших нарицательное название «Черёмушки» от первого экспериментального жилого района № 9 на месте деревни Черёмушки, вошедшей в 1956 году в состав Москвы и ставшей районом массового жилищного строительства.

По мере накопления негативного опыта строительства современных зданий безразличных к окружению, грубо его подавляющих своими размерами, масштабом архитектурных членений и чужеродностью отделочных материалов, росло убеждение, что продолжение подобной практики может окончательно уничтожить историческую городскую среду. Действительно, неоправданное и несомасштабное акцентирование отдельных модернистских объектов нередко приводило к сносу памятников архитектуры (например, при строительстве Нового Арбата в Москве). Ответом на тотальную

утилитарность и унифицированность форм модернистской архитектуры, принижающих значимость исторической застройки, в архитектуре XX века рождается новое явление, направленное на сохранение исторического своеобразия городов. В советской архитектуре происходит переосмысление модернистской архитектуры в контексте организации пространства архитектурно-исторической среды. Параллельно в Европе в это же время начинают зримо воплощаться теоретические принципы «контекстуализма».

Анализ понятий «средового подхода», развивающегося в отечественной архитектуре и европейского «контекстуализма», показал, что у данных явлений больше сходств, чем различий. Несмотря на жесткое неприятие в СССР любой постмодернистской терминологии, основной задачей обоих методов было улучшение и обогащение проектных решений, связанных с необходимостью гармонизации процесса «встраивания» архитектурных объектов в сложившееся городское пространство. Есть, конечно, и отличия, проявившиеся в широком диапазоне «архитектурных доктрин» средовых методов: от свободного участия потребителя в проектировании в странах Запада, до административно-командного управления всеми процессами в рамках единой методологии и идеологической концепции. Тем не менее, по мере успешного воплощения в архитектурной практике «средового подхода» и «контекстуализма», а также по мере формирования теоретической базы этих средовых методов, развивающихся с разницей лишь в десятилетие, в Советской России и за рубежом, происходит качественный прорыв в области разработки теоретических трудов, дидактических материалов и практико-ориентированных методических пособий.

Основателем отечественной доктрины «средового подхода» можно по праву считать А.Э. Гутнова, сторонника концепции пешеходных улиц в центрах городов, под руководством которого был разработан и претворён в жизнь проект превращения Арбата в пешеходную улицу. Идеи «средового» подхода, зародившиеся в эпоху советского модернизма 60-х, годов XX в., получили свое развитие в постмодернистский период архитектурной истории России. Как и в европейской, примерно с конца 1970-х гг., так и в отечественной практике с начала 1990-х гг., «средовой подход» гармонично встраивается в стилистику постмодернизма. В западноевропейской теории архитектуры термин «постмодернизм» впервые используется в 1949 г. В российской архитектурной теории он появляется с изданием в 1986 г. перевода книги Ч. Дженкса «Язык архитектуры постмодернизма». В данной работе автор выделил следующие направления в постмодернизме: историзм; ретроспективизм; воспроизведение местных особенностей; контекстуализм; метафора и метафизика; постмодернистское пространство [1]. Таким образом, два направления архитектуры – «средовой подход» в России, и «контекстуализм» на Западе – постепенно эволюционируя, становятся частью постмодернистской проектной культуры. Тем не менее, и в наше время не утихают споры о сходстве и фундаментальных различиях этих исторически знаковых архитектурных явлений.

Говоря о различиях этих явлений, необходимо отметить, что наиболее значимые отличия «средового» подхода и «контекстуализма» сводятся к различным трактовкам понятия «городской среды», как объекта приложения метода средового подхода. Можно выделить две основные точки зрения. Исследователи, разделяющие первую точку зрения, считают «средовой» подход глобальной культурной тенденцией и проявлением постмодернизма в отечественной архитектуре. Это понимание приближается к трактовкам Чарльза Дженкса и российского теоретика архитектуры Александра Раппопорта, описавшего наиболее характерные черты нового в отечественной практике подхода к формированию предметно-пространственной среды в архитектурном проектировании. В своих исследованиях А. Раппопорт придает большое значение роли реконструктивных работ в условиях историко-культурного контекста, говоря о необходимости сохранения материального и духовного потенциала овековеченного в городской среде. Акцентируя такие важные аспекты проектной деятельности, как внимательное отношение к потребностям и вкусам потребителя, архитектор одновременно призывает к активному вовлечению потребителей в процесс созидания объекта, расширяя тем самым рамки творческого взаимодействия автора проекта и конечного пользователя. Одним из наиболее характерных аспектов средового подхода в архитектурном проектировании Раппопорт называет постепенный отход от жестких

функциональных доктрин. По мнению известного отечественного теоретика архитектуры, выделенные им основные аспекты «средового» подхода, не только сохраняют свое значение в настоящем, но и вероятно не утратят его в будущем [2].

Вторая точка зрения касается понимания «контекстуализма» как интерпретации «средового» подхода в зарубежной практике. Исследователи, придерживающиеся ее, считают, что «средовой» метод в России – есть не что иное, как метод «контекстуализма» на Западе: «контекстуализм» впервые проявился в западной архитектуре постмодернизма 1970-х годов в качестве одного из его стилистических течений, что было впервые определено Ч. Дженксом в его работе «Язык архитектуры постмодернизма» [1]. Во второй половине XX века контекстуальный метод получил название «включающего» в зарубежной архитектуре и метод «средового подхода» – в отечественной, став одним из приоритетных методов проектирования в исторической среде [3].

В силу идеологических причин советские исследователи архитектуры не могли писать о влиянии «постмодернизма» на современную советскую архитектуру, тем не менее, в печать проникали приближенные к реальности интерпретации происходящего в отечественном зодчестве поворота. К примеру, А. Рябушин в своей попытке осмысления новых тенденций в советской архитектуре 1970-1980-х гг. пишет о преодолении функционалистской догматики, на смену которой приходит новая профессиональная идеология, среди основополагающих принципов которой – контекстуализм, историзм, обращение к региональным и национальным особенностям и традициям, символические начала, местное своеобразие, средовое проектирование и включающий подход [4].

Необходимо отметить, что теоретическое моделирование и анализ имеющегося опыта проектирования берет свое начало в зарубежном архитектуроведении (Европа, США) в 1950-е годы, в отечественном – в 1970-е годы. Вопрос сохранения целостности архитектурно-исторической среды, ее восприятия и использования в качестве объекта проектирования интересовал таких отечественных ученых, как А.Э. Гутнов, А.В. Иконников [5], С.М. Михайлов [6] и др. Проблемой современных объектов в архитектурно-исторической среде, еще в Советском Союзе, занимались коллективы ученых научно-исследовательских институтов: ЦНИИТИА (ныне НИИТАГ РААСН), Академии архитектуры (ныне РААСН), а также ряд научных институтов Госгражданстроя, ЦНИИП градостроительства и другие научные учреждения. Исследования в данной области продолжаются и сегодня, так в новейших научных публикациях затрагиваются проблемы стиля архитектуры конца XX века: А.Г. Раппапорт «Стиль и Среда» (М., 2011), А.А. Зайцев «Контекстуализм как стилистическое течение в архитектуре конца XX-начала XXI вв.» (Н.Новгород, 2013) [3], Н.Н. Харченко «Средовой подход в архитектурно-исторической среде» (Казань, 2016) [7], Gideon Ç. «Rethinking the Role of Context and Contextualism in Architecture and Design» (Famagusta, 2012) [8] и др.

Кроме теоретического осмысления, развитие «средового подхода» происходило и в проектной практике – им занимались архитекторы проектных организаций Москвы, Ленинграда и других городов по всему СССР. Одним из таких примеров можно считать здание выставочного зала, построенного для Союза художников ТАССР в 1979 году по проекту авторского коллектива архитекторов, работавших в проектном институте «Татгражданпроект»: В.П. Мулюкина, Р.Х. Галеева под руководством Г.А. Бакулина.

Выставочный зал Союза художников – удачный дебют средового подхода, один из первых объектов, который удалось запроектировать на основе нового метода с учетом адресного проектирования (рис. 1). Модернистское здание расположилось на перекрестке улиц Карла Маркса и Комлева (Муштари) в окружении разнохарактерных исторических зданий, главным из которых является стоящий по диагонали особняк начала XX века – бывшая резиденция командующего Казанским военным округом – усадьба генерала Сандецкого. Сложное в планировке здание выставочного зала, в основе композиции которого лежит идея динамичного развития формы, выделяется своим «бруталистским» объемом и, в то же время, органично вписывается в окружающее пространство. Гармонизация сложного архитектурного и исторического пространства достигается снижением этажности до уровня карниза исторического особняка, объемом, расчлененным уступами к углу перекрестка, движением, уходом одного фасада в другой и даже «отсутствием» главного фасада. Фасады, как вспоминает Герман Алексеевич

Бакулин<sup>1</sup>, были сделаны очень простые, в них не было так называемых «изюминок», находок, и они представляли собой довольно простые геометрические формы. Таким образом, новое модернистское здание галереи само по себе стало элементом поддерживающей застройки, элементом среды.



Рис. 1. Выставочный зал Союза Художников ТАССР в г. Казани. Архитекторы: Г.А. Бакулин (руководитель авторского коллектива), Р.Х. Галеев, В.П. Мулюкин, 1979 г.

В целях разбора методологии работы архитекторов и определения отправных точек для принятия архитектурного решения проектируемого здания авторам публикации показалось важным более подробно рассмотреть проект Выставочного зала Союза художников, ставшее сегодня знаковым объектом модернистической архитектуры Казани. Разговор с главным архитектором проекта Германом Алексеевичем Бакулиным помог восстановить аспекты «средового подхода» в логике размышления разработчиков и выделить некоторые принципиальные позиции, легшие в основание проектного решения. Нужно отметить, что методология проектирования при «средовом подходе» включает в себя комплексный градостроительный анализ, широко применяемый в современной практике и, с одной стороны, как будто бы не представляющий новизну для современного специалиста. С другой стороны, на период последней четверти XX века комплексный градостроительный анализ находился еще в стадии становления и с исторической точки зрения интересно посмотреть, как он встраивался в профессиональную деятельность. Тем более, что то внимание, которое проектная группа уделила композиционному анализу, а также глубина проработки архитектурного образа и композиционного решения самого объекта, позволили не только получить городу проект высокого архитектурного качества, но само по себе представляет ценность и образец работы над объектом в исторической среде.

Итак, Выставочный зал планировался в историческом центре города – перед архитекторами стояла задача сохранения цельности исторической среды и так называемого «духа места». Сложность состояла в том, что историческая часть города уже сложилась композиционно, имела свои признаки одновременного строительства, это обстоятельство требовало учета внешних аспектов исторического и культурного контекста. Первое, что сделали авторами проекта – провели многофакторный предпроектный градостроительный анализ, исследовали средовое окружение, контекст, композиционные особенности рядом стоящих зданий и самой композиции улицы как целостного объекта.

В результате градостроительного анализа сложилось несколько ключевых моментов. Во-первых, была выявлена пространственная неоднородность улицы Карла

<sup>1</sup> Интервью Г.А. Бакулина от 22.12. 2016.

Маркса, заключающаяся в разнице её перекрёстков: в то время как все перекрестки имели четкие геометрические крестообразные фигуры, перекресток с улицей Комлева (Муштари), был особенный, объёмы формирующих его зданий отступали вглубь кварталов, а образующая его геометрическая фигура, таким образом, вписывалась в овал. Дом Сандецкого отстоял от угла палисадником с оградой и как бы «разгружал» перекресток. К тому же, главное здание усадьбы Сандецкого представляло собой локальный градостроительный акцент, имеющую сложную форму. Отсюда градостроительное решение по организации проектного перекрестка, авторы увидели в том, чтобы «отступив» от перекрестка, «не вылезая» при этом на угол, поддержать овальную конфигурацию перекрестка, тем самым, использовать характер этого места и учесть доминирующую роль исторической усадьбы генерала Сандецкого.

Вторым ключевым моментом проектного решения и наиболее простейшей из проектных задач стало принятие регламента по высоте объекта – три этажа было проще всего выдержать, поскольку сложившаяся застройка продиктовала этажность нового объекта. Сложнее было определить композиционную основу здания – какой должна стать «фраза, интонация на этом перекрестке» с точки зрения семиотики. Необходимо было войти в этот перекресток наиболее корректно, поэтому Г. Бакулин посчитал, что следует искать такие решения, которые позволили бы, не вступая в диалог, уйти от соревнования «дня сегодняшнего с днем вчерашним». Исходя из этой позиции, «ранжир» нового здания должен был быть ниже, значит, этажность и высоту нужно было снизить – новое здание галереи само по себе должно представляться элементом поддерживающей застройки, элементом среды. Это был наиболее важный момент с точки зрения степени активности нового объекта на перекрестке.

Далее после определения роли объекта в ансамбле улицы необходимо было сформировать идею с точки зрения его композиционного и архитектурно-образного решения. Дом Сандецкого, отстоя от перекрёстка, имел организацию фасадов в традиционном классическом исполнении – это здание в стиле эклектики, уже имевшего отзвук нового времени: элементы модерна присутствовали в самой ассиметричной композиции здания, что и придавало ему самобытный казанский образ. Демонстрируя себя, как опорный объект перекрестка, дом Сандецкого брал на себя функцию локального акцента своей статичностью и богатым пластическим решением.

Для Выставочного зала Герман Бакулин предложил другую идею и представил схему своих размышлений в виде здания, которое не стоит, а движется вместе с трамваями, автобусами, автомобилями. Всей своей композицией объект демонстрирует движение в сторону площади Свободы и эта динамика, которая начиналась с улицы Карла Маркса и продолжалась по улице Комлева (Муштари), подчеркивая отсутствие прямого стилистического и композиционного диалога. Такая динамика как бы демонстрировала, что новое здание «идет», а старое здание «стоит». Если один человек идет, а другой стоит, между ними не может развиваться полноценный системный разговор, он может быть в виде фразы или какого-то конкретного сообщения. На этой семиотической легенде была построена информационная сторона рассматриваемого проекта.

Свои рассуждения авторы представляли на больших чертежах – на развертках, изображавших целые улицы, где «ступенька» здания Выставочного зала вписывалась в овал, образующий перекресток. Размер этих ступенек в свою очередь, находил поддержку в модуляциях архитектурной формы проектного участка, в частности дома Сандецкого, имевший тот же масштаб и размер здания. В плане дом Сандецкого «разбит на куски» примерно такого же размера, как и здание выставочного зала. Метрическое сопоставление, то есть способ деления пространства на понятные размеры, позволило «подтянуть» метрическую сторону, чтобы обеспечить размерное и масштабное единство перекрестка К. Маркса-Комлева (Муштари).<sup>2</sup>

В ходе проектирования и строительства Выставочного зала проектные задачи решались на широком градостроительном фоне, при этом возникали дополнительные, касающиеся не только самого архитектурного объекта, задачи, связанные с улицей, как с целостным объектом. Для их решения на основе градостроительного анализа были

<sup>2</sup>Интервью Г.А. Бакулина от 22.12. 2016.



сделаны композиционные выводы, построена семиотическая «легенда» проектной концепции. В самом здании Выставочного зала Союза художников удалось найти выразительное решение классической архитектурной задачи «угла квартала»: три отступающих от угла друг за другом пилонообразных объема четко обозначили главный вход в здание и освободили место для небольшой аванплощади [9].

Сегодня, на фоне переживания множества эпизодов разрушительного вторжения в ткань исторической городской застройки Казани, здание Выставочного зала выгодно отличается своей уместностью и сомасштабностью к окружающей среде. Таким образом, проект архитекторов под руководством Г.А. Бакулина можно считать одним из самых ярких примеров органичного включения интернационального по стилю и довольно крупного по тем временам сооружения в исторически сложившуюся пространственную среду города Казани и первым проектом Казани, при проектировании которого был осознанно применен передовой проектный метод «средового подхода».

В заключение необходимо отметить, что проблемы исследования модернистского наследия и проектной практики 1970-1980-х гг. в контексте методологии «средового подхода» актуальны и тесно связаны с современными проблемами архитектуры наших дней. При всем сегодняшнем плюрализме градостроительных решений, современной архитектуре Казани и России в целом зачастую не достаёт ансамблевого единства архитектурной идеи и содержания, архитектурной культуры при вписывании в городскую застройку, сомасштабности с окружением. Архитектуру советского модернизма, связанную с методами «средового подхода» характеризуют с лучшей стороны грамотные решения, архитектурное единство и гармоничные соотношения форм, ансамблевый подход и интеграция в городскую среду. Несомненно, помимо эстетической и художественной ценности, архитектура советского модернизма обладает архитектурно-градостроительной ценностью [10].

Исследование «средового подхода» показало, что одной из наиболее характерных особенностей советского модернизма стала работа архитекторов в контексте средового пространства города – не с отдельными архитектурными объектами, а со средой в целом: с улицей и площадью как с целостным объектом. Впервые в истории советской архитектуры здание стало рассматриваться как часть единого архитектурно-пространственного комплекса, единого с окружающими его территориями городских районов и кварталов [11]. Основным ценностным качеством архитектуры периода советского модернизма является тот факт, что именно в сфере проектирования общественных зданий и общественных комплексов периода советского модернизма было положено начало средовым принципам организации нового общественного градостроительного пространства. Лучшие проектные решения советского модернизма всегда включали учёт архитектурного и ландшафтного окружения (здание Казанского цирка, театра им. Г. Камала). Таким образом, можно с уверенностью сказать, что средовой подход в архитектуре советского модернизма – это основной и неотъемлемый принцип советского градостроительства 1980-х гг., определивший на десятилетия вперед основные векторы развития современной отечественной архитектуры.

Резюмируя, необходимо отметить, что с успехами средового подхода тесно связаны вопросы качества современных проектных решений. Именно в 1970–1980-е годы прошлого века наша страна заявила о себе, вписав очередную страницу в мировую историю архитектуры. Это был исторический период расцвета советского модернизма, когда молодые талантливые архитекторы, не обремененные необходимостью оглядываться на действовавшие официальные и цеховые установки, участвуя в международных «бумажных» конкурсах, показали потенциальные возможности отечественной архитектурной школы. Примечательно, что большинство их проектов было рефлексией на историческую среду, своеобразным проявлением средового подхода.

Сегодня интерес к «средовому подходу» сохраняется, но его современное понятие стало более емким и распространяется не только на исторически ценные объекты и территории [12]. Под средовым подходом, необходимо понимать всю деятельность человека связанную с переосмыслением отношений человека к природе, историческому и культурному содержанию предметно-пространственной среды. А это значит, что необходимо научиться быть толерантными практически к любым явлениям окружения –

вне зависимости от того, к какому историческому периоду они относятся – к XVIII или XX веку, а применительно к архитектуре – и к какому стилю – классицизму или модернизму. Необходимо понимать, что в рамках средового подхода архитектурное сообщество имеет право быть критичным и избирательным лишь по отношению к явлениям нашей современности, оставляя будущим поколениям разнообразный и аутентичный архитектурный контент.

### Список библиографических ссылок

1. Jencks Ch. A. The Language of Post-Modern Architecture. NY : Rizzoli, 1977. 136 p.
2. Багрова Н. В., Кущенко М. А. Особенности современной интерпретации средового подхода в архитектуре // Ползуновский вестник. 2014. № 1. С. 22–26.
3. Зайцев А. А. Контекстуализм, как стилистическое течение в архитектуре конца XX-начала XXI вв. : Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. арх. // НГАСУ. Н. Новгород, 2013. 25 с.
4. Фесенко Д. Запоздалый расцвет. О постмодернизме в советской архитектуре // INTELROS. URL: [http://www.intelros.ru/subject/figures/teoriy\\_arh\\_processa/6774-zapozdalyy-rascvet-o-postmodernizme-v-sovetskoj-arhitekture.html](http://www.intelros.ru/subject/figures/teoriy_arh_processa/6774-zapozdalyy-rascvet-o-postmodernizme-v-sovetskoj-arhitekture.html) (дата обращения: 25.10.2017).
5. Иконников А. В. Архитектура XX века. Утопии и реальность. М. : Прогресс-Традиция, 2002. 669 с.
6. Михайлов С. М., Михайлова А. С., Надыршин Н. М. Дизайн города в историческом аспекте // Дизайн-ревью. 2013. № 1-2. С. 115–120.
7. Харченко Н. Н. Средовой подход в архитектурно-исторической среде. Автореф. магистерской диссертации // КГАСУ. Казань, 2016. 97 с.
8. Gideon Ç. Rethinking The Role of Context and Contextualism in Architecture and Design: Dis. ... in the form of a sc. p. m. of arch. s. Famagusta, 2012. 121 p.
9. Саначин С. П. Экскурс в архитектурную жизнь советской Казани. Казань : Фолиант, 2015. С. 234.
10. Ефимов Д. Д., Фахрутдинова И. А. Архитектура общественных зданий периода советского модернизма как актуальная тема исследования регионального наследия (60-80 гг. 20 в.) // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 64–71.
11. Ефимов Д. Д. Об историко-культурной и архитектурно-градостроительной ценностях архитектуры общественных зданий города Казани периода советского модернизма: сб. научных трудов V-й Международной научно-практической конференции «Культурное наследие в XXI веке: сохранение, использование, популяризация» / КГАСУ. Казань, 2017. С. 125–129.
12. Скокан А. А. Проблемы средового подхода к современной московской архитектуре // Архитектура и строительство Москвы. 2001. № 2-3. С. 26–32.

**Fachrutdinova I.A.** – candidate of architecture, associate professor

E-mail: [fahinessa@mail.ru](mailto:fahinessa@mail.ru)

**Efimov D.D.** – post-graduate student

E-mail: [daniel.efimoff@gmail.com](mailto:daniel.efimoff@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**The environmental approach in the regional architecture of the Soviet modernism of 1970-1980-ies, in the design of the Exhibition Hall of the Union of Artists of the TASSR in Kazan, the architects: G.A. Bakulin (head of the authors group), R.Kh. Galeev, V.P. Mulyukin**

### Abstract

*Problem statement.* The goal of the research is to identify and summarize the facts related to the environmental approach and targeted design using the example of the project of the Exhibition Hall of the Union of Artists of the TASSR.

*Results.* The study revealed that:

- The principles of the environmental approach were formulated by the theorists of the Soviet architecture in the 70-80-ies, in parallel with the similar stylistic trend of «contextualism», and influenced the design of objects of modernist architecture of the late XXth century.

- Analysis of the project of the Exhibition Hall of the Union of Artists of the TASSR, developed by the architect G.A. Bakulin on the basis of the environmental approach, revealed the main aspects of the method of environmental design in key positions: the consideration of the cultural and historical aspect, integration into historical development, the composition, scale, plastic structure of the building.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the architecture is to identify the methodological aspects of the environmental approach that can be used in the design and architectural practice of today. The analysis of the project of the Exhibition Hall of the Union of Artists of the TASSR increases the knowledge about the history and value of regional architecture.

**Keywords:** architectural and historical environment, cultural and historical context, town-planning situation, contextualism, environmental approach, targeted design, regional architecture of the Soviet modernism period.

### References

1. Jencks. Ch. A. The Language of Post-Modern Architecture. NY : Rizzoli, 1977. 136 p.
2. Bagrova N. V., Kushchenkova M. A. Features of modern interpretation of the environmental approach in architecture. Polzunovskii vestnik. 2014. № 1. P. 22–26.
3. Zaytsev A. A. Contextualism, as a stylistic trend in the architecture of the late XX-early XXI centuries: Abstract. dis. for the competition uch. Art. Cand. arch. // NGASU. N. Novgorod, 2013. 25 p.
4. Fesenko D. The belated flowering. On postmodernism in Soviet architecture // INTELROS.RU. URL: [http://www.intelros.ru/subject/figures/teoriy\\_arh\\_processa/6774-zapozdalyj-rascvet-o-postmodernizme-v-sovetskoj-arxitekture.html](http://www.intelros.ru/subject/figures/teoriy_arh_processa/6774-zapozdalyj-rascvet-o-postmodernizme-v-sovetskoj-arxitekture.html) (reference date: 25.10.2017).
5. Ikonnikov A. V. Architecture of the XX century. Utopias and reality. M. : Progress-Traditsiya, 2002. 669 p.
6. Mikhailov S. M., Mikhailova A. S., Nadyrshin N. M. Design of the city in historical aspect // Design-revue. 2013. № 1-2. P. 115–120.
7. Kharchenko N. N. Environmental approach in the architectural and historical environment. Avtoref. masterskoy dissertatsii // KGASU. Kazan, 2016. 97 p.
8. Gideon Ç. Rethinking The Role of Context and Contextualism in Architecture and Design: Dis. ... in the form of a sc. p. m. of arch. s. Famagusta, 2012. 121 p.
9. Sanachin S. P. Excursion to the architectural life of the Soviet Kazan. Kazan : Foliant, 2015. P. 234.
10. Efimov D. D., Fakhrudinova I. A. Architecture of public buildings of the period of Soviet modernism as an actual topic of research of regional heritage (60-80-ies of the XXth century) // Izvestiya KGASU. 2016. № 2 (36). P. 64–71.
11. Efimov D. D. Historical and cultural, architectural and urban values of public architecture of the soviet modernism period in the city of Kazan: dig. of art. of the V international scientific-practical conference «Cultural heritage in the XXIst century: the preservation, use and popularization» / KSUAE. Kazan, 2017. P. 125–129.
12. Skokan A. A. Problems of the environmental approach to modern Moscow architecture // Arkhitektura i stroitel'stvo Moskvy, 2001. № 2-3. P. 26–32.

УДК 72.03

**Чебинев А.И.** – профессор

E-mail: [art.sasha.i@yandex.ru](mailto:art.sasha.i@yandex.ru)

**Чебинева Е.В.** – старший преподаватель

E-mail: [chebineva@yandex.ru](mailto:chebineva@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **РАТН – «подземный город» Торонто**

### **Аннотация**

*Поставленные задачи.* РАТН (дорога / тропинка), является крупнейшим торговым комплексом, который играет большую роль в экономике и культурной жизни города. Целью статьи является исследование предпосылок возникновения подземного города в центральной части Торонто и история его строительства.

*Результат.* Анализ теоретических исследований позволил проследить ряд принципов использования подземных территорий под строительство зданий общественного назначения в стесненных городских условиях. Выявить структуру расположения и взаимных связей отдельных сооружений с существующими наземными постройками, а также двухуровневую увязку общественного, личного транспорта и пешеходных связей.

*Выводы.* Выявленные принципы архитектурно-пространственной организации подобных комплексов или их отдельных частей могут лечь в основу проектирования фрагментов городских структур мегаполисов.

**Ключевые слова:** Большой Торонто, подземный город, высоко комфортная городская среда, новое строительство.

На сегодняшний день, в Большом Торонто (Great Toronto Area) – экономическом центре Канады, проживает 5 928 тысяч человек, и его население, благодаря стабильному потоку иммигрантов, постоянно растет. Как в любом североамериканском городе, его жители предпочитают жить в собственных домах, и в связи с этим территория, отведенная под малоэтажную жилую застройку, увеличивается с каждым годом, расширяя границы города во все стороны, кроме юга, где озеро Онтарио выступает в качестве естественного ограничителя. Несмотря на широкую географию проживания, большой процент жителей работают в Downtown – центральной части Торонто. Здесь же размещен и подземный город РАТН (дорога / тропинка), который играет большую роль в экономике и культурной жизни города: отчасти РАТН дублирует силуэт застройки делового центра города, с той только разницей что размещен он ниже уровня земли и имеет ограниченные функции.

### **История возникновения РАТН**

Появление подземного города датируется 1900 годом. Первой и основной причиной его строительства явилось желание бизнесмена Тимоти Итона, владевшего большим торговым центром в самом сердце города, на перекрестке улиц Yonge и Queen, и его вторым зданием Annex, расположенным за мэрией, сделать жизнь своих клиентов более комфортной: в суровых зимних условиях, вместо того чтобы переходить из здания в здание по улице, они получили возможность продолжать делать покупки на общей территории двух торговых центров. Естественно, что в городе где климатические условия довольно суровые, это добавило бизнесу особую привлекательность. Это был первый подземный пешеходный путь в Торонто, который и считается историческим предшественником существующей сети РАТН. Более того, этот туннель все еще используется как часть системы РАТН, хотя сегодня он соединяет торговый центр Toronto Eaton Center с офисным комплексом Bell Trinity Square.

Следующее ответвление подземного города, согласно записям городского архива, было построено в 1927 году, и соединяло оно платформу железнодорожной станции Union Station и Royal York Hotel. Комфорт в данном случае так же был основным

критерием, так как в это время Торонто неоднократно посещали не только известные и состоятельные люди, но и члены Британского королевского семейства, и городские власти были напрямую заинтересованы в успехе этих визитов. Эта ветка также остается неотъемлемой частью сегодняшней сети PATH.

В историческом контексте, ключевыми для развития города Торонто стали 1960 года, когда город начал стремительно расширяться. Причиной тому были и экономический рост страны, спровоцированный волнами иммигрантов, требующих новых мест приложения труда, и расширение строительства зданий общественного назначения в связи с разросшимся населением. Городские улицы стали значительно более загруженными, система городского транспорта требовала своего пересмотра, а если учесть, что вся управленческая и экономическая структуры сосредоточились в центральной части города, это не могло не сказаться на общем плане города – деловой центр постепенно вытеснил исторически сложившиеся предприятия малого бизнеса, и встал вопрос о том, где теперь будут располагаться все эти маленькие магазинчики, пекарни и прочие заведения.

Главный архитектор города, Мэтью Лоусон, принял план по расширению сети подземного строительства и убедил нескольких инвесторов при возведении высотных зданий предусматривать строительство подземных торговых площадей, пообещав при этом, что они в конечном итоге будут связаны между собой в единую сеть. Очевидно, что заинтересованность в таком подходе была обоюдной: оказывая финансовую поддержку, городские власти решали транспортную проблему и получали дополнительные площади для наземного строительства, а люди бизнеса – дополнительную финансовую выгоду. Застройщики центральной части Торонто, одного из крупных городских проектов в 1960-х годах (завершенные в 1967 году), первыми включили объекты подземного строительства в свой комплекс, с возможностью их расширения в будущем. Однако вскоре, в связи с реформой городского совета, финансирование прекратилось.

Вновь пришедшие лидеры отказали в финансовой поддержке проекта, так как посчитали более важным сохранение активной уличной жизни городских кварталов, поощряя потребителей к покупкам в маленьких частных магазинах, а не в торговых центрах (будь то над землей или ниже). Однако однажды начатая инициатива находила поддержку среди отдельных инвесторов и арендаторов, и продолжала развиваться спорадически, образуя точки будущей системы подземного города. В данном случае основным критерием был уже не комфорт, а финансовая заинтересованность – подземное строительство позволило владельцам мало стоящих подвалов превратить их в одни из самых ценных торговых площадей в стране.

Более централизованное расширение сети туннелей произошло в 1970-х годах в связи со строительством и подземным подключением офисной башни Richmond-Adelaida и гостиничного комплекса Sheraton Center. В 1987 году городской совет поставил вопрос о разработке единой системы подземных коммуникаций. Дизайнерские фирмы Gottschalk + Ash International и Muller Design Associates были привлечены не только к разработке, но и внедрению общей системы, которая должна была составить своеобразный скелет, включающий уже существующие постройки, и определить рациональные места для дальнейшего строительства. Работа велась в тесном сотрудничестве с владельцами земли, городскими властями и заинтересованными в дальнейшей аренде торговых площадей сторонами. В результате работы подземные коммуникации приобрели четкую схему, соответствующую направлениям наземных магистралей и дорог.

Для того чтобы обеспечить свободную ориентацию посетителей в подземном пространстве, в начале 1990-х годов была начата работа над его цветовой кодировкой. Практически во всех зданиях пешеходы могут найти карту системы PATH, где каждая буква имеет свой цвет, обозначающий направление по странам света: Красный (R) – представляет юг, Оранжевый (A) – направляет пешеходов на запад, Синий (T) – ориентирует их на север, Желтый (H) – указывает на восток.

Последние работы по расширению PATH велись в августе 2014 года по направлению на юг, что приблизило его к набережной Торонто с открытием пешеходного моста, соединяющего центр Air Canada с югом с WaterPark Place на набережной Queens (пересекающий коридор Lake Shore Boulevard / Gardiner Expressway и Harbor Street).

### **РАТН: современное состояние**

РАТН согласно Guinness World Records, является крупнейшим подземным торговым комплексом пассажей. Он имеет 371 600 квадратных метров торговых площадей, заключенных в двух крупных универмагах, торговых центрах, мелких магазинах, предприятиях малого бизнеса. Здесь работает около 5000 человек. Он объединяет здания жилого назначения, общественных центров, отелей и банков.

Весь комплекс подземного города вписан в территорию прямоугольной формы, занятой десятками кварталов в уровне городской застройки. С трех сторон он ограничен веткой метрополитена, проходящей под городскими магистралями. Станции метро – являются одним из связующих звеньев общественного транспорта с подземным городом.

С севера система РАТН ограничена улицей Dundas на которой размещены городской автовокзал Toronto Coach Terminal и станция метро Dundas. Ее пересечение с центральной улицей Yonge образует площадь, по своей пропускной способности, являющейся самой посещаемой не только в Торонто, но и в Канаде. Здесь сосредоточена активная жизнь города: деловая, торговая и культурная. Станция метро Dundas узловая, через нее проходят две ветки: одна с юга, от озера Онтарио и далее на север, другая связывает восточный и западный районы города. Южная граница РАТН обозначена улицей Queens Quay на которой размещена станция метро Waterpark Place. В непосредственной близости от метро располагаются конечные станции автобусного и железнодорожного терминалов GO. Этот вид экспресс – транспорта позволяет людям, живущим в отдаленных районах и городках от Торонто, в течение 1 часа добраться до его центральной части и не выходя на поверхность земли по подземным тротуарам выйти к месту их работы. На западе границей системы РАТН является улица University, на востоке Yonge – центральная улица города. На этих улицах размещены еще три терминала метро. Все терминалы связаны между собой уровнем РАТН, поэтому совсем не удивительно, когда в зимнее время года в подземном городе можно встретить людей, одетых не в соответствии с погодой. Таким образом, система РАТН обеспечивает связи пешеходных путей со всеми видами общественного транспорта более 200 000 ежедневным пассажирам, тысячам туристов и городским жителям.

### **Парковки**

Город постоянно расширяет свои границы, отведенные под жилищное строительство, и удаленность жилья от мест приложения труда, а зачастую и от общественного транспорта, делает жителей Торонто, зависимыми от автомобиля. Как в любом мегаполисе большой процент жителей работают в центральной части города, поэтому скопление автомобилей в рабочие дни, особенно в центре, при высокой стоимости земли и ее дефиците привело к нехватке парковочных мест. Крыши общественных зданий, как резервные площади, до какого-то времени справлялись с нагрузкой, но во второй половине 19 века вопрос парковок встал очень остро. Удачи строительства первых единоличных высоток, включенных в РАТН, позволили поставить вопрос строительства подземных парковок, вначале как сопутствующих отдельным зданиям, позже самостоятельных городских. Таким образом дефицит парковочных мест удалось устранить благодаря строительству на площадях, зарезервированных в процессе проектирования. Двадцать пять парковок рассредоточены по всей площади РАТН, имеют от 5 до 7 уровней и обеспечивают стоянками автомобили сотрудников учреждений, служащих и жителей высотных жилых зданий. Все уровни парковок связаны между собой и зданиями скоростными лифтами. Это позволяет беспрепятственно попасть с любого уровня подземного гаража на уровень РАТН, городскую улицу и выше в общественное или жилое здание.

### **Горизонтальные коммуникации**

Сеть коммуникаций обеспечивает возможность передвижения в системе РАТН по подземным туннелям, ориентированным по направлению городских улиц. Однако это не значит, что РАТН однозначно следует их рисунку.

Общая протяженность пешеходных путей РАТН составляет более 30 км – это сеть перпендикулярно связанных между собой коридоров; между которыми размещаются площади торговых предприятий различного назначения. Одни из них – основные

пешеходные пути, ориентированные с севера на юг, не только связывают высотные здания жилого, общественного назначения и отели, но и являются своеобразными границами вдоль которых линейно размещаются торговые сооружения подземного города. В них коридоры, как основные пути передвижения значительной ширины, несут наибольшую нагрузку по проходимости (рис. 1). Основные коридоры, вдоль которых разместились разного рода мелкие предприятия малого бизнеса, помимо пешеходного назначения играют роль рекреаций. В этих случаях зона ожидания или отдыха с местами для сиденья размещается по середине, выполняя роль разделительного островка для идущих в разных направлениях людских потоков. Рекреации также являются неотъемлемой частью гостиниц – они образуют обширные холлы при выходе из лифтов на уровне РАТН и граничат с основными коридорами.



Рис. 1. Основные пути передвижения

Второстепенные распределительные туннели расположены перпендикулярно по отношению к основным коридорам, разделяют большие по площади пространства на более мелкие, на которых кооперируются малые предприятия в зависимости от их функционального назначения и объема. Ширина второстепенных связующих переходов колеблется в зависимости от сконцентрированных на данной площади предприятий и их местоположения в общей сети РАТН.

Туннели, выполняющие соединительную функцию между отдельными изолированными сегментами подземной застройки выполняют роль исключительно «проходной» зоны. Их ширина позволяет использовать поверхности стен под рекламу.

### **Вертикальные коммуникации**

Поскольку естественный рельеф местности имеет значительный перепад в отметках по направлению С-Ю, при планировании РАТН это привело к необходимости использования средств вертикальных коммуникаций (пандусов, лестниц, эскалаторов и лифтов для инвалидов, передвигающихся в колясках), которые обеспечивают связь между уровнями земли и подземного города.

### **Перекрестки**

Подземные основные и второстепенные пешеходные пути на своем пересечении образуют перекрестки с общей численностью 60. В системе городской застройки перекрестки занимают различное местоположение и при одной функции (вертикальных коммуникаций) несут различную нагрузку по пропускной способности и назначению. Зоны перекрестков системы РАТН можно разделить на три основные группы:

– в местах пересечения основных наземных транспортных и пешеходных потоков перекрестки выполняют роль крупного распределительного узла и по вертикали, и по

горизонталю; лифты и эскалаторы – основной вид связей между многоуровневыми площадями; границы зоны перекрестка формируют крупные предприятия торгового и общественного назначения (рис. 2);



Рис. 2. Вертикальные коммуникации

– в местах сосредоточения зданий общественного назначения (банки, офисы); здесь большей частью формируются зоны общественного питания и небольшие предприятия обслуживания; подземные уровни, доходящие до трех, связаны эскалаторами;

– на городских улицах в местах необходимых вертикальных связей с подземным уровнем по всей системе РАТН устраиваются лестницы; как связь, и как индивидуальный навигатор лестницу используют отели и крупные общественные центры.

Зоны перекрестков оформляются средствами дизайна варианты, которых не повторяются. Небольшие перепады высот на основных горизонтальных коммуникациях на всем их протяжении, решаются устройством лестниц и пандусов.

### **Общественные здания**

Высотные здания, включенные в систему РАТН, вне зависимости от их назначения имеют входы в двух уровнях – с поверхности земли и уровня подземного города. Служащие, приезжающие на работу в метро или автомобиле, не выходя на поверхность земли, беспрепятственно могут попасть к своему рабочему месту, размещенному в уровне РАТН, либо в общественных зданиях, включенных в его систему. Более того, по пути следования к месту работы они могут получить практически все виды услуг: от банковских до бытовых. Таким образом, РАТН можно рассматривать как абсолютно самостоятельный город в городе. Для жителей Торонто и туристов наиболее привлекательными являются торговые предприятия – это крупные универмаги и торговые центры, которые наличием подземных уровней значительно увеличили свои площади (рис. 3). Протяженные торговые центры в горизонтальной плоскости состоят из двух объемов объединенных внутренней пешеходной улицей основного направления с фиксированным началом и концом пути. Их значительная длина разбивается на отдельные фрагменты средствами благоустройства. Такой прием зрительно сокращает длину пути и дает возможность физического отдыха. Абрис ограждающих конструкций наземных этажей соответствует границам подземных торговых залов. Торговые площади универмагов, размещаясь между основными пешеходными путями, образуют более компактные объемы, что позволяет размещать входы и выходы рассредоточено равномерно по пути следования покупателей. В некоторых из них подземные этажи по площади превышают границы наземных этажей.





Рис. 3. Торговая улица

Вестибюли банков, входящих в систему, помимо своей основной функции входного и координирующего узла выполняют роль разделительно-проходную, отсекая верхние этажи от подземных. В верхние этажи, где размещаются рабочие места клерков, вход посетителям недоступен. Помещения, предназначенные для работы с клиентами размещены в подземных этажах. Здесь проводятся все виды операций с участием сотрудников банка, либо через терминалы. Зона обслуживания клиентов подземного этажа занимает значительные площади и концентрируется возле вертикальных коммуникаций: лифтов, соединяющих все этажи банка, лестниц и эскалаторов для посетителей. Мелкие отделения банков, чаще терминалы, размещаются на основных путях в системе РАТН (рис. 4).



Рис. 4. Банковские терминалы

Идея привлечения покупателей и удержания их надолго – одна из основных при создании подземного города, поэтому пункты общественного питания в системе РАТН – одни из наиболее востребованных мест. Таким образом, в торговых центрах и местах сосредоточения офисных зданий часть подземного города отдана общепиту – там расположены так называемые food courts. В таких центрах сконцентрированы, кафе, пиццерии (большой популярностью пользуются известные франшизы Subway, Pizza, а также ресторанчики всевозможной национальной кухни) которые рассредоточены по всей сети РАТН и пользуются огромной популярностью не только у офисных работников, но и городских жителей, предпочитающих питаться вне дома, туристов и покупателей (рис. 5). Для сокращения длины путей передвижения посетителей, экономии

времени, отведенного на перерыв, такие места общественного питания устраиваются точно в нескольких уровнях.



Рис. 5. Зона общепита

Кроме того, по ходу движения РАТН с определенной периодичностью и на пересечении подземных улиц, расположены небольшие уголки перекуса «на бегу», где предлагают быстро сваренный кофе и булочки так любимые всеми канадцами кофейни Tim Hortons, Second Cup, Country Style, Starbucks.

### Навигация

Заблудиться в подземном городе невозможно. Разработанный ранее метод цветовой навигации дает общую ориентацию схемы РАТН по странам света. Следующим этапом привязки к месту явился схематичный план с местоположением крупных зданий и объединенных площадей малых предприятий в сети основных и второстепенных путей передвижения (рис. 6).



Рис. 6. Схема подземного города

Такие планы установлены во всех ключевых местах системы. Более детальная локация осуществляется при помощи визуальных указателей. По пути передвижения, в поле зрения установлены табло с указанием переходов подземного города, перекрестков и названием улиц, им соответствующих. Вертикальные поверхности стен задействованы для обозначения общественных зданий, жилых домов и их адресами. Таким образом, производится полная идентификация подземной городской сети с городской наземной структурой. Как вспомогательное средство ориентации используются поверхности пола. Более того, повсеместно, в особенности в местах расположения лестниц и эскалаторов, применена специальная система обозначения Signage для людей с ограниченными возможностями.

В 2011 году город Торонто выпустил долгосрочный план расширения PATH на север, предусматривающий расширение площади вдвое. Доступ к подземным площадям будут обеспечивать новые 45 точек, с общей сетью коммуникаций, увеличенной до 60 километров.

### Список библиографических ссылок

1. Артоболевский С. С. Регулирование городских агломераций в странах Европы. URL: <https://web.toronto.ca/explore-enjoy/visitor-services/path-torontos-downtown-pedestrian-walkway/> (дата обращения: 02.10.2017).
2. Васильев Д. В. Опыт регулирования развития крупных городов в зарубежных странах // В кн. Экономические методы регулирования развития крупных городов. Л. : Наука, 1990.
3. Гольц Г. А. Транспорт и расселение. М. : Наука, 1981.
4. Крихул Анжела. Администрация Торонто о плане расширения PATH. Торонто: Изд-во Глоб энд Майл, 2014. URL: <https://beta.theglobeandmail.com/report-on-business/toronto-shines-a-light-on-underground-path/article4189910/?ref=http://www.theglobeandmail.com&> (дата обращения: 27.10.17).
5. Лежава И. Г. Архитектурное пространство и функция // Проблемы архитектуры. М. : Стройиздат, 1981.
6. Лакей Джек. Для туристов, это может быть путь в никуда. Торонто: Изд-во Торонто Стар, 2011. URL: [https://www.thestar.com/yourtoronto/the\\_fixer/2009/08/26/for\\_some\\_visitors\\_its\\_a\\_path\\_that\\_leads\\_nowhere.html](https://www.thestar.com/yourtoronto/the_fixer/2009/08/26/for_some_visitors_its_a_path_that_leads_nowhere.html) (дата обращения: 27.10.17).
7. Город Торонто – факты о PATH. URL: <https://beta.theglobeandmail.com/news/toronto/toronto-mulls-plan-to-expand-worlds-longest-underground-shopping-complex/article4201903/?ref=http://www.theglobeandmail.com&> (дата обращения: 02.06.2017).
8. Михайлов С. М., Михайлова А. С., Белов М. И., Филимонова Ю. М. Гендерные установки в дизайне города // Дизайн Ревю. 2015. № 1-4.
9. Александрер К., Исекаева С., Силверстайн М. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство: (пер.с англ. И. Сыровой). М. : Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2014.
10. Глазычев В. Л. Урбанистика. М. : Европа, 2008.

**Chebinev A.I.** – professor

E-mail: [art.sasha.i@yandex.ru](mailto:art.sasha.i@yandex.ru)

**Chebineva E.V.** – senior lecturer

E-mail: [chebineva@yandex.ru](mailto:chebineva@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### PATH – underground city of Toronto

#### Abstract

*Problem statement.* PATH (road/path), is the largest shopping complex, which plays a big role in the economy and cultural life of the city. The purpose of the article is to study the

prerequisites for the emergence of an underground city in the central part of Toronto and the history of its construction.

*Results.* The analysis of theoretical studies made it possible to trace a number of principles for the use of underground areas for the construction of public buildings in cramped urban conditions. Identify the structure of location and interconnections of individual structures with existing land structures, as well as a two-level linkage between public, private transport and pedestrian links

*Conclusions.* The revealed principles of the architectural and spatial organization of such complexes or their separate parts can form the basis for the design of fragments of city structures of megacities

**Keywords:** Big Toronto, underground city, highly comfortable urban environment, new construction.

### References

1. Artobolevsky S. S. Regulation of urban agglomerations in European countries. URL: <https://web.toronto.ca/explore-enjoy/visitor-services/path-torontos-downtown-pedestrian-walkway/> (reference date: 02.10.2017).
2. Vasiliev D. V. experience in regulating the development of large cities in foreign countries // In the book. Economic methods of regulating the development of large cities. L. : Science, 1990.
3. Golts G. A. Transport and resettlement. M. : Nauka, 1981.
4. Kryhul Angela. Administration of Toronto on PATH expansion plan. Toronto Izd-vo Globe and Mail, 2014. URL: <https://beta.theglobeandmail.com/report-on-business/toronto-shines-a-light-on-underground-path/article4189910/?ref=http://www.theglobeandmail.com&> (reference date: 27.10.2017).
5. Lezhava I. G. Architectural space and function // Problemy arkhitektury. M. : Stroiizdat, 1981.
6. Lakey Jack. For some visitors, it s a path that leads nowhere. Toronto: Izd-vo Toronto Star. URL: [https://www.thestar.com/yourtoronto/the\\_fixer/2009/08/26/for\\_some\\_visitors\\_its\\_a\\_path\\_that\\_leads\\_nowhere.html](https://www.thestar.com/yourtoronto/the_fixer/2009/08/26/for_some_visitors_its_a_path_that_leads_nowhere.html) (reference date: 27.10.2017).
7. City of Toronto – PATH facts. Toronto.ca. URL: <https://beta.theglobeandmail.com/news/toronto/toronto-mulls-plan-to-expand-worlds-longest-underground-shopping-complex/article4201903/?ref=http://www.theglobeandmail.com&> (reference date: 02.06.2017).
8. Mikhailov S. M., Mikhailova A. S., Belov M. I., Filimonova Yu. M. Gender settings in the design of the city // Dizain Revyu. 2015. № 1-4.
9. Alexandrr K., Issekaeva S., Silverstein M. Language of templates. Cities. Building. Construction: (translated from English I. Syrova). M. : Izd-vo Studii Artemiya Lebedeva, 2014.
10. Glazychev V. L. Urbanistics. M. : Europe, 2008.



УДК 72

**Авксентьева Т.В.** – старший преподаватель

E-mail: [avx2@mail.ru](mailto:avx2@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Волосатова С.А.** – искусствовед

**Санкт-Петербургский университет технологии и дизайна**

Адрес организации: 191186, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18

## **Реализмы на все времена**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы являлось переосмысление понятия реализма как художественного метода, в современных условиях, применительно к архитектурной среде. Влияние метода «социалистического реализма» на художественные произведения.

*Результаты.* Рассмотрены яркие примеры синтеза скульптуры и архитектуры в истории, начиная с Древнего Египта, заканчивая современными конкурсными работами в области обустройства городских общественных пространств. Роль идеологии в формировании образа художественных произведений, на примерах скульптур, решенных в стиле «соцреализма» – в мемориальных комплексах, парках, в общественных пешеходных зонах.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в понимании того, что с изменением образа города неизбежно меняется «реализм», приобретая новую «окраску», форму, творческий метод. Трактовок понятия «реализм» множество, но их объединяет одно – правдивое отражение действительности, в мировом искусстве этот метод существовал всегда, существует и сегодня. Чем точнее отражены основные стороны жизни социума, потребности и устремления, тем реалистичнее произведение. Синтез архитектуры, скульптуры, «архитектуры воды» и «архитектуры света», геопластики земли обогащает городскую среду, делая ее более комфортной для горожанина.

**Ключевые слова:** архитектура, скульптура, «социалистический реализм», художественный стиль, архитектурный акцент, монументальность, городская среда.

История человечества беспрестанно меняется, оставаясь запечатленной в определенный момент в памятниках материальной и духовной культуры. В основе всего этого процесса заложена реальность, которая каждый раз проходит сквозь бесконечно меняющуюся призму восприятия человечества. На примере искусства можно наглядно наблюдать, как пресыщенность общества (здесь рассматривается западноевропейская культура и общество соответственно) одним, ведет к тому, что уже через определенное время маятник общественного мнения склоняется совершенно в противоположную сторону. Это возможно было наблюдать уже в искусстве Древнего Египта в период правления Эхнатона (т. н. амарнский период), это же заставляет европейского человека нового времени отрицать всеми силами готику, а через три столетия рокальные формы заменять строгой античностью. Архитектура играет ведущую роль в организации городского пространства, являясь своеобразным фоном для объемно-пространственных композиций более мелкого масштаба: скульптур, малых архитектурных форм, тех многочисленных элементов, из которых складывается «городская ткань», сеть площадей и пешеходных пространств. Архитектура задает тон, определяет стилистический вектор, масштаб, в некоторой степени, и материал для будущих компонентов городского пространства. Необходима ли скульптура в городе? Какую роль она играет и как сосуществует между собой.

В истории скульптура неразрывно связана с архитектурой, являясь ее частью, кирпичиком – скульптура служила как опорный элемент: кариатиды, атланты, капители, консоли. Стены фасадов украшали скульптурные композиции: в арках, на фронтонах, на порталах. Скульптурные рельефы украшали с древних времен фасады построек. На пример в Египте, храм в Абу Симбеле (рис. 1).

В Древнем Египте скульптура имела магический характер. Двойник умершего человека – Ка, только внешне походил на оригинал (точная портретная копия), без передачи характера и внутреннего мира человека. С помощью этой модели умерший «узнавал» свое тело и «возвращался в него». Это ли не реализм?



Рис. 1. Храм в Абу Симбеле [8]

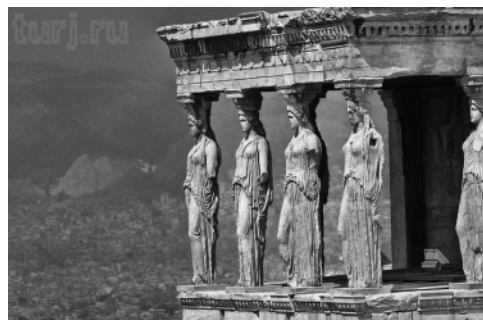


Рис. 2. Парфенон [8]

Атланты и кариатиды в архитектуре Греции – Парфенон (рис. 2), великолепный синтез архитектуры, скульптуры и живописи древнего Рима. По истечении времени скульптура начинает «жить самостоятельно». Римские скульпторы, в отличие от греческих, стремились «схватить» индивидуальные черты персоны, ее характер, но в основном это было только портретное сходство, а тело бога. Это начало психологического портрета. В средние века намечается утрата к персонализации в скульптуре, например Ута и Экахарт из Наумбургского собора. В эпоху Возрождения скульптурным произведениям характерно портретное сходство, пристальное внимание к индивидууму. Примером такого подхода могут служить работы Донателло<sup>1</sup>, Микеланджело<sup>2</sup>. Любая смена направления в искусстве это непростая забава художников, но признак глубоких перемен в обществе, изменивших самую его суть. Когда вызванный к жизни эпохой просвещения классицизм к середине XIX века стал «доведенной до совершенства пошлостью и тщательно вылизанным вздором» [1] академизма, романтизм и вслед за ним реализм явились единственным способом вдохнуть в искусство новую жизнь.

Реализм, как направление искусства складывается в период второй половины XIX века, как ответ на доведенную до крайности идеализацию персонажей и сцен, доставшихся еще с эпохи Возрождения. Рассматривая вопрос о проявлении реальной жизни сквозь призму искусства, не следует обозначать это проявление «рафинированным» понятием «реализм». Поскольку, несмотря на то, что в каждую эпоху в искусстве прослеживается стремление наиболее точно проявить жизнь сквозь объекты материальной культуры, сам реализм как направление в искусстве разветвляется на множество течений, каждое из которых стремится к несколько иным целям, одновременно воспевая жизнь как она есть: импрессионизм, натурализм, гиперреализм и т.д.

Реализм (от фр. *realisme*, от лат. *realis* – вещественный) – направление в литературе и искусстве, ставящее основной целью правдивое воспроизведение объективной действительности в ее типических чертах<sup>3</sup>. Трактовок понятия «реализм» множество, но их объединяет одно – правдивое отражение действительности, в мировом искусстве этот метод существовал всегда, существует и сегодня. Чем точнее отражены основные стороны жизни социума, потребности и устремления, тем реалистичнее произведение. Меняется время, меняется «реализм», приобретая новую «окраску», форму, творческий метод. Просветительский, критический, социалистический, современный реализм.

<sup>1</sup> Донателло – итальянский скульптор эпохи Возрождения, основоположник индивидуализированного скульптурного портрета. Донателло придерживался реалистических принципов, иногда кажется, что он нарочно отыскивал некрасивые стороны природы. (Википедия).

<sup>2</sup> Микеланджело Буонарроти полное имя Микеланджело ди Лодовико ди Леонардо ди Буонарроти Симони итальянский скульптор, художник, архитектор, поэт, мыслитель. Один из крупнейших мастеров эпохи Возрождения и раннего барокко (Википедия).

<sup>3</sup> Ожегов С. И. Словарь русского языка. М. : Государственное Издательство Иностраных и Национальных Словарей. Издание четвертое, исправленное и дополненное, 1960. 900 с.

Реализм рассматривается как художественный стиль, считается, что он возник в эпоху Просвещения (XVIII в.). Но можно ли выдвигать гипотезу реализма мифологизированного в Древней Греции (изображения современников в идеализированном, поэтическом виде ?).

В эпоху критического реализма, вторая половина 19 в. тема неравенства, «пропасти», разделяющей богатых и бедных, тяжелой жизни простых людей, находит отражение в скульптуре жанриста-передвижника Позена. Он сторонник критического реализма. В 1880-1890-х годах на передвижных художественных выставках его скульптуры: «Пашня в Малороссии», «На волах», «Нищий», «Переселенцы» – получили высокую оценку. Жизнь, показанная без прикрас, нищее русское крестьянство. Критик В.В. Стасов призывал русских художников вскрывать «язвы» общества, быть ближе к действительности.

Личность человека неразрывно связывается с социумом, с обществом. Осмыслиется место личности в этом обществе, вскрываются самые наболевшие проблемы современников. Реалистичность проявляется по-разному. Воздействие художественного образа скульптурного произведения не зависит от степени сходства с объектом, от натуралистичности изображения. Под понятие реализма можно «подвести» русскую древнюю сюжетную скульптуру народных мастеров, иногда натурализм нереалистичен, он не является жизненным, не раскрываются наболевшие вопросы действительности, абстрактная скульптура или инсталляция может более точно показать существующую реальность.

Синтез искусственно – созданного ландшафта, архитектурных объемов, фонтанов, прудов, скульптуры и городской мебели формирует эстетически, эмоционально, богатое пространство. Примерами могут служить архитектурные дворцовые ансамбли Франции, Германии эпохи Возрождения. Вопрос о комплексном подходе к проектированию таких объектов актуален и сегодня.

Один политический строй сменяет другой, меняются и стили. Стиль (фр. style, гр. Stylos палочка для письма у древних греков) – единство основных идейно-художественных особенностей, отличительных черт, проявляющихся в творчестве писателя, художника, скульптора, архитектора, композитора и т.д. В более широком смысле – то же, что течение в искусстве, т.е. единство основных идейно-художественных особенностей ряда писателей, художников, композиторов и т.д., отражающих в своих произведениях идеологию определенного класса. Для стиля советского искусства характерен художественный метод социалистического реализма<sup>4</sup>.



Рис. 3. Л. В. Шервуд «Часовой» [2]

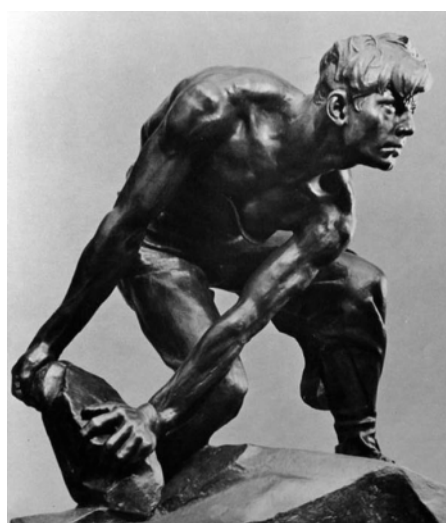


Рис. 4. И. Д. Шадр  
«Бульжник – оружие пролетариата» [2]

<sup>4</sup> Словарь иностранных слов. Под редакцией Лехина И.В., проф. Петрова Ф.Н. М.: Государственное Издательство Иностранных и Национальных Словарей, 1949. 808 с.

Сильным толчком для появления нового стиля в искусстве послужила революция в России 1917 года. Страна Советов. Период времени 20 века, ориентировочно с 1917 по 1991 г. Вершина развития советской художественной культуры. Понимание истории глазами художников, основная канва их произведений – это постоянная классовая борьба и установление власти народа. В 20-х годах прослеживаются две основные тенденции в искусстве. Творческая интеллигенция, не принявшая революцию, с ее принципами и с другой стороны, художники, которые поэтизировали действительность, верили в истинность целей коммунизма. Героями становятся большевики с железной волей, люди труда, воины-освободители и т.п. Примерами могут служить работы: Л.В. Шервуда «Часовой» (рис. 3), И.Д. Шадра «Булыжник – оружие пролетариата» (рис. 4), М.Г. Манизера «Памятник В. И. Ленину в Ульяновске», В.И. Мухиной «Рабочий и колхозница», Н.В. Томского «памятник С.М. Кирову в Ленинграде», Е.В. Вучетича «Памятник советскому воину-освободителю в Трептов-парке Берлина, «Перекуем мечи на орала», мемориальный комплекс в Волгограде «Мать-Родина».

Скульпторы шли на заводы, в красноармейские казармы, ехали в колхозы, чтобы увидеть жизнь своих будущих моделей, «запечатлеть» ее. Было много художественных течений. Одни черпали вдохновение у «передвижников», другие в новейших европейских течениях. Был разработан план «Монументальной пропаганды». «...В основу деятельности мастеров советской пластики положен ленинский план монументальной пропаганды» [2]. Суть этого плана состояла в том, что монументальное искусство должно влиять на идейно-художественное воспитание новых людей, граждан Социалистического государства. Появляется понятие «социалистический реализм». Социалистический реализм (соцреализм) – художественный метод литературы и искусства (ведущий в искусстве Советского Союза и других социалистических стран), представляющий собой эстетическое выражение социалистически осознанной концепции мира и человека, обусловленной эпохой борьбы за установление и созидание социалистического общества. Изображение жизненных идеалов при социализме обуславливает и содержание, и основные художественно – структурные принципы искусства. Его возникновение и развитие, связаны с распространением социалистических идей в разных странах, с развитием революционного рабочего движения.

Принципы этого художественного метода:

Народность. Герои произведений это яркие представители народа, в широком понимании этого слова: крестьяне, рабочие, солдаты, труженицы села и промышленности.

Партийность. Необходимо показать приверженность к партии, к классовой борьбе с капитализмом за светлое будущее. Прослеживается сильная идеологическая составляющая.

Конкретность. Во главу угла ставится доктрина исторического материализма (сознание вторично, материя первична).

Реализм становится одним из самых популярных и востребованных стилей в изобразительном искусстве. В советский период, в России он нашёл яркое выражение. В скульптурных работах показано настроение социалистической эпохи – воспевание труда рабочих и крестьян на грани самоотверженности. В скульптуре, в частности в городской скульптуре, прослеживается гротеск, некоторая поэтизация («Перекуем мечи на орала» Е.В. Вучетича). Много работ было выполнено на военную тематику.

Метод социалистического реализма был предписан всем видам искусства, включая архитектуру и прикладное искусство, что значительным образом тормозило их художественное развитие, мешало подлинной народности и традиционности искусства. С середины 60-х годов развитие советского искусства все меньше оказывалось связано с нормами и требованиями социалистического реализма, которые вскоре отпали как устаревшие.

Реалистическое искусство XX в. приобретает яркие национальные черты и многообразие форм. Реализм – явление противоположное модернизму. Как бы ни были широки и многообразны возможности реалистических методов в искусстве, они не беспредельны, и попытки размыть границы реализма могут привести к его уничтожению. Реалистическим тенденциям зачастую приходится бороться с тенденциями, тормозящими и ограничивающими развитие реализма как целостного творческого метода.



Ярким примером реализма в скульптуре может служить скульптурная композиция у дворца земледельцев в г. Казани (рис. 5). По условиям конкурса, памятник должен поддерживать сложившуюся архитектурную среду, сомасштабно сосуществовать с исторической застройкой Кремля, с его сложным силуэтом. Задача состояла в том, чтобы увязать, удачно вписать скульптурное произведение в окружение, «попасть» в масштаб данной территории. Сочетание красивой монументальной и помпезной архитектуры Дворца земледельцев, со скульптурой крестьянской трудовой семьи, с архитектурой воды, с фонтаном дает «богатство» восприятия окружающего пространства.



Рис. 5. скульптор Кислов А.К., арх. Авксентьева Т.В.  
Скульптура «Труженики агропромышленного комплекса» (эскизный проект)

В конкретном предложенном месте, это решение является единственно верным, тщательно продуманным. Вода является мощным акцентом для любого города, близость реки Казанки «диктует» свои правила для принятия архитектурных решений. Синтез скульптуры и фонтана «усиливает звучание» всей объемно-пространственной композиции. Водный купол фонтана обогащает городскую панораму и созвучен силуэту Кремля, центральная водная вертикаль, поднимающаяся из центра колосьев перекликается с минаретами мечети Кул Шариф, со Спасской башней, с башней Сююмбике. Исторически сложился синтез скульптуры и фонтанов (Версаль, Петергоф, ф-н Треви в Риме). В тоже время архитектура воды сдержанна и графична, что соответствует официальности данного места. Расположенный рядом с Дворцом парк нуждается в водно-скульптурном акценте. На такой значимой для города территории может сформироваться Казанский «Версаль». Формируется комфортная городская среда так необходимая для людей, живущих в крупных городах, для их эмоционального здоровья.

XX век в искусстве – это время выхода в абстракцию. Все, кто пишет об этом периоде времени и изменений в искусстве отмечают важную роль технического прогресса в сдвиге общественной парадигмы. В основе всего лежит индустриализация, как «основное событие века» [3]. Именно она приводит к тому, что мир начинает двигаться с новой, все увеличивающейся скоростью. Первыми это замечают и передают в своём искусстве футуристы, взывающие «против бесхребетного культа старых холстов, старых статуй» [3]. В 1912 году художник-футурист Умберто Боччони публикует «Технический манифест футуристической скульптуры», в котором с резкой критикой выступает против копирования современными художниками классических статуй в поисках «идеалов красоты». В своей живописи он идет вслед за абстракцией В. Кандинского, которая, по словам самого Кандинского, сформировалась в его творчестве, в том числе и под влиянием сделанного французским физиком Антуаном Анри Беккерелем в 1896 году открытием радиоактивности: «...разложение атома... отозвалось во мне подобно внезапному разрушению всего мира» [4].

Однако первый шаг к абстракции был сделан реализмом, а точнее стремлением художника сделать свое творение еще более живым. Известна история, превратившаяся в легенду о скульптуре «Бронзовый век» Огюста Родена, которую в Парижском Салоне 1878 года раскритиковали как обыкновенный слепок с тела натурщика (рис. 6) [6]. Именно Родену принадлежит честь называться родоначальником современной скульптуры [6], когда в 1898 году был со скандалом открыт его «Памятник Бальзаку» (рис. 7).



Рис. 6. Огюст Роден. Бронзовый век  
(фото автора)



Рис. 7. Огюст Роден. Памятник Бальзаку  
(фото автора)

Б. Виппер характеризует скульптуру, как искусство, у которого «даже в пределах телесного, вещественного мира есть естественные границы» [7]. Соответственно, естественным является то, что когда в начале XX века происходит смена восприятия действительности, или расширение границ этого восприятия, появляется отторжение к старому языку форм, ярко проявившемуся в выше упомянутом манифесте Боччони от апреля 1912 года. По наследству, через творчество Родена, а потом Матисса, Бранкузи, Пикассо и футуристов скульптура двигалась по направлению противоположному реализму, по пути, который избрали для себя Майоль (рис. 8) или Лембрук (рис. 9) сохранявшим в себе отсылку на античную традицию.



Рис. 8. А. Майоль Гора  
(фото автора)



Рис. 9. В. Лембрук. Grosse Sinnende, 1913  
(фото автора)

К 30-м годам XX века на политической карте мира складывается два полюса противостояния: страны с так называемым демократическим и тоталитарными режимами – и искусство оказывается одним из способов противопоставить один режим другому. Одним из ярких событий, иллюстрирующих сложившуюся ситуацию можно считать открывшиеся в 1937 году в Германии друг напротив друга и практически в один день две выставки под названием «Великое немецкое искусство» [9] и «Дегенеративное

«искусство» [9]. Прославляли «немецкое чувство», работающие в неоклассической манере, такие ведущие скульпторы третьего рейха, как Арно Брекер и Йозеф Торак.

Все три страны – Италию, Германию и СССР – объединяло их недавнее образование на политической карте и необходимость создать миф и переписать историю нации на новый манер. Борьба с модернизмом в первую очередь велась ими по той причине, что он рождал опасный «субъективизм» и поощрял индивидуальность в форме оригинального видения, персонального стиля. Бесстрастные же герои соцреализма, основанные на античной традиции, помогали, по словам А. Жданова, «воспитывать трудящихся в духе коммунизма».

Тем не менее, и Италия, и Германия и Россия в последствии, каждый в разное время столкнутся с переходным периодом. Для Германии этот период наступит в 60-е годы, и ярко проявится в творчестве художников круга Йозефа Бойса. Для России этот период наступил сравнительно недавно, после распада СССР. Только с 90-х годов искусство так называемого соцреализма перестало быть государственной идеологией, странным образом сложив необычную картину с одной стороны перехода России к традиции, как модернизма, так и постмодернизма одновременно.

Параллельно с переходом одних художников или возникновение их внутри традиций постмодернизма, остается открытым трудный вопрос неосознанного до конца прошлого. Традиция соцарта в современной России по причине их недавнего главенства вызывают у публики характерную усталость и отторжение. Тем не менее, эта традиция – наследие длинного периода истории России, которое должно быть переработано и осознано для продолжения русского искусства, его перехода в будущее. Современная городская среда немыслима сегодня без интерактивных элементов, она приобретает все новые качества, становится сложнее. «Представляет большой интерес изучение интерактивности как совершенно нового, стремительно ворвавшегося в наш мир и приковавшего пристальное внимание представителей самых разных профессий явления и в дизайне» [10].

### Список библиографических ссылок

1. Бодлер Ш. Салон 1859 г. URL: <http://bodlers.ru/1859-Sovremennyj-hudozhnik.htm> (дата обращения: 04.10.2017).
2. Бычков Ю.А. С веком наравне. Книга о скульптуре. Т. 3. М. : Молодая гвардия, 1974. 400 с.
3. Futurist Manifestos / Ed. By Umbro Apollonio. L., 1973. С. 25–26.
4. Дюхтинг Х. Кандинский. М. : Арт-Родник, 2002. С. 10.
5. Bernard Champigneulle. Rodin. London: Thames and Hudson, 1999. С. 6–50.
6. Фостер Х., Краусс Р., Буа И. А., Бухло Бенджамин Х. Д., Джослит Д. Искусство с 1900 года. Модернизм, антимодернизм, постмодернизм. М. : Ад Маргинем, 2015. С. 57.
7. Виппер Б. Р. Статьи об искусстве. М. : Искусство, 1972. С. 158.
8. Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная\\_страница](https://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная_страница) (дата обращения: 30.09.2017).
9. Электронная библиотека. URL: [http://hyperlib.libfl.ru/search\\_course.php?details=1&filos=&fil=&art=on...12](http://hyperlib.libfl.ru/search_course.php?details=1&filos=&fil=&art=on...12) (дата обращения: 16.10.2017).
10. Михайлова А. С. Интерактивная среда в окружении человека // Дизайн-ревью. 2012. № 1-2. С. 132.

**Avksenteva T.V.** – senior lecturer

E-mail: [avx2@mail.ru](mailto:avx2@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Volosatova S.A.** – art critic

**St. Petersburg University of Technology and Design**

The organization address: 191186, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya st., 18

## Realism for all time

### Abstract

*Problem statement.* The aim of the work was to rethink the concept of realism as an art method, in modern conditions, with reference to the architectural environment. The influence of the method of «socialist realism» on works of art.

*Results.* Considered are vivid examples of the synthesis of sculpture and architecture in history, beginning with Ancient Egypt, ending with modern competitive works in the field of arrangement of urban public spaces. The role of ideology in the formation of the image of artistic works, examples of sculptures decided in the style of «socialist realism» – in memorial complexes, parks, in public pedestrian zones.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the architectural environment is in understanding that with the change in the image of the city, «realism» inevitably changes, acquiring a new «color», form, creative method. There are many interpretations of the concept of «realism», but they are united by one – a truthful reflection of reality, in the world art this method has always existed today. The more accurately reflected the main aspects of the life of the society, the needs and aspirations, the more realistic the work. Synthesis of architecture, sculpture, «water architecture» and «architecture of light», geo-plastics of the earth enriches the urban environment, making it more comfortable for the townspeople.

**Keywords:** architecture, sculpture, «socialist realism», artistic style, architectural accent, monumentality, urban environment.

### References

1. Bodler S. Salon 1859. URL: <http://bodlers.ru/1859-Sovremennyj-hudozhnik.htm> (reference date: 04.10.2017).
2. Bychkov Yu. A. With the century on a par. The book is about sculpture. Т. 3. М. : Molodaya gvardiya, 1974. 400 p.
3. Futurist Manifestos / Ed. By Umbro Apollonio. L., 1973. P. 25–26.
4. Dyuhting H. Kandinsky. М. : Art-Rodnik, 2002. P. 10.
5. Bernard Champigneulle. Rodin. London: Thames and Hudson, 1999. P. 6–50.
6. Foster H., Krauss R., Bois I. A., Buchlo Benjamin H. D., Joslit D. Art from the year 1900. Modernism, antimodernism, postmodernism. М. : Ad Marginem, 2015. P. 57.
7. Vipper B. R. Articles about art. М. : Art, 1972. P. 158.
8. Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная\\_страница](https://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная_страница) (reference date: 30.09.2017).
9. Electronic library. URL: [http://hyperlib.libfl.ru/search\\_course.php?details= 1 & filos = & fil = & art = on ... 12](http://hyperlib.libfl.ru/search_course.php?details= 1 & filos = & fil = & art = on ... 12) (reference date: 16.10.2017).
10. Mikhailova A. S. Interactive environment in the environment of a person // Dizain-revyu. 2012. № 1-2. P. 132.

УДК 725.949

**Гиззятова Л.Р.** – начальник мастерской стратегических исследований

E-mail: [lilya.gizziatova@gmail.com](mailto:lilya.gizziatova@gmail.com)

**ООО «Архитектурный десант»**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Баумана, д. 19, оф. 301

**Краснобаев И.В.** – кандидат архитектуры

E-mail: [tia.kgasu@gmail.com](mailto:tia.kgasu@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Временная архитектура общественного назначения: предпосылки, история, классификация и потенциал современного развития**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью статьи, резюмирующей магистерскую диссертацию выпускника КГАСУ 2014 года, было обоснование перспективности разработки и внедрения временной архитектуры в общественных пространствах городов вопреки государственной политике в России по устранению временных сооружений из центральных городских зон.

*Результаты.* На основе обобщения теоретических, исторических предпосылок и современного международного опыта использования временных сооружений общественного назначения обоснована актуальность их развития в современном качестве, выявлена типология градостроительных, функциональных и композиционных решений, показан потенциал современных композиционных решений, повышающих качество общественных пространств российских городов.

*Выводы.* Временная архитектура является наиболее отзывчивой к потребностям населения в сфере торговли и организации досуга, может различными способами эффективно заполнять городские «пустоты», выступать самой доступной площадкой творческого манифеста архитекторов, обладает способностью выразить современные идеалы гибкости, легкости и мобильности.

**Ключевые слова:** временная архитектура, временные сооружения общественного назначения, павильоны, архитектура массовых мероприятий.

На современном этапе развития качества архитектуры, создания грандиозных проектов Москва-сити, застройки Дубай небоскребами, часто возникает вопрос, зачем нужны временные сооружения (далее ВС), что оправдывает их существование в мегаполисах? ВС всегда были частью городского пространства, однако негативный оттенок их наличия в России стал проявляться только после указа 1992 года «О свободе торговли», когда на фоне дефицита потребительских товаров в торговой сети ВС в форме частных торговых киосков стали бесконтрольно появляться в российских городах, заполняя «пустоты» городского пространства, что можно определить как «павильонный бум». В настоящее время внешний вид этих сооружений, функциональное содержание, формируемое ими окружение, не соответствуют растущим требованиям к качеству городской среды. Основным решением этой проблемы для крупных российских городов (Москва, Санкт-Петербург, Казань, Нижний Новгород) стала жесткая регламентация зон размещения, композиции, образа и эстетических характеристик. Например, в Москве с 2011 по 2013 год было ликвидировано 6 из 10 тысяч объектов мелкорозничной торговли за устаревшие стандарты и эстетику фасадов, в Казани их число сократилось с 2246 в 2009 г. до 903 в 2013 г. В 2013 году был принят ФЗ № 271 «О розничных рынках», который не внес значительных изменений, но привел к сокращению числа временных торговых сооружений, увеличению радиуса доступности объектов торговли, возникновению несанкционированных ВС внутри квартальной застройки и росту цен вплоть до 9 %. Временная архитектура (далее ВА) дискредитирована в глазах властей и жителей.

С другой стороны, внимание к ВА со стороны мирового профессионального сообщества говорит о ее практическом потенциале, а вручение в 2014 году высшей

международной архитектурной награды – Прицкеровской премии Шигеру Бану – автору множества ВС из бумаги, дерева и картона, подтверждает этот интерес. Проводятся международные выставки, форумы и проектные семинары, где центром внимания становятся ВС. Если на Венецианской Биеннале, международных ЕХРО, Лондонском фестивале архитектуры и пр. давно используются авторские ВС, то в Россию новый подход к данной типологии пришел в 2004 г. (постройки в клязьминском пансионате «Пирогово»), и ВА стала средством выражения культурного и политического протеста. Первыми были загородные фестивали: «Города» (2006-2013 гг.), «Архстояние» (с 2006 г.), «Сибирский БухАрт» (2007), а с 2010 г. ВА возрождается в городских парках и общественных пространствах (парк им. Горького, парк «Музеон», сад им. Баумана, Новая Голландия). ВА осознается жанром, способным выразить современные идеалы гибкости, легкости, подвижности и мобильности.

Анализ научных исследований в области ВА выявил отсутствие четких формулировок понятия «временная архитектура», «временное сооружение», противоречие между понятиями «мобильное» и «временное»; отсутствие комплексного подхода в изучении ВС общественного назначения, определяющего дальнейшие векторы развития городской среды.

Слово «временный» как минимум в английском (temporary), французском (temporaire) и немецком (zeitweilig) эквивалентах в переводе означает «существующий ограниченное количество времени». Понятие трактуется как противоположность постоянному, а в архитектуре – капитальному. Анализ существующих нормативных документов, определений, представленных в научных и теоретических исследованиях выявил критерии, выделяющие ВС, как самостоятельную типологию: сезонность, мобильность, отсутствие фундамента (не заглубленные фундаменты), изначальное условие возведения на определенный срок, быстровозводимость, срок службы зданий. На их основе были сформированы следующие термины:

- Временное сооружение – сооружение с ограниченным временным существованием на определенном месте, максимальный срок службы которого составляет не более 10 лет, имеющее, как правило, облегченную конструкцию без заглубленных фундаментов.

- Временная архитектура – род некапитальных сооружений с ограниченным временем существования на определенном месте, максимальный срок службы которых составляет не более 10 лет, имеющих, как правило, облегченную конструкцию без заглубленных фундаментов.

Обращаясь к истории ВА, в качестве первых ВС можно привести ветровые заслоны и шалаши, которые использовались как святилища, либо как укрытия в теплых широтах. Они стали прообразом более поздних тентовых сооружений – палаток римских легионеров, шатров бедуинов, североамериканские типи и монгольских юрт (майханов), которые в свою очередь вдохновляют сооружения современной мобильной архитектуры. Например, в шатрах или майханах использовался актуальный донине конструктивный принцип сжатия стоек и растяжения мембраны, конструкцию типи можно сравнить с пространственной рамой с мембраной из животных шкур, в азиатской юрте использовались модульные принципы организации, которые легли в основу архитектуры XX века. К древнейшим ВС можно отнести библейскую скинию Завета – первый переносной храм [6]. Из истории древнего Рима известен сюжет о гигантском тенте, натянутом над Колизеем, который удивлял сильнее гладиаторских боев. В Средневековье появляется типология тентовых сооружений, связанных с военным делом. На период эпохи Возрождения приходится период становления ВА как жанра садово-паркового искусства и элемента городских шествий (например деревянные сооружения на колесах, покрытые лепниной или расписанными холстами в Париже), появляются цирки шапито [3]. В XVII-XIX веке типология ВС расширяется (например таможенные павильоны – они же декоративные входные арки в Париже (архитектор К.Н. Леду); в Санкт-Петербурге – деревянные павильоны в саду Михайловского дворца (архитектор К.И. Росси), резные павильоны Чайного и Кофейного домиков в Летнем саду).

С середины XIX века ВА стала основой международных выставок, каждая из которых привлекала большое количество архитекторов и активно влияла на изменения представлений об архитектуре, начиная с Хрустального дворца на первой выставке 1851 года. В России важной вехой стала первая сельскохозяйственная выставка 1923 года в Москве. В ее создании участвовали известные архитекторы: А.В. Щусев, И.В. Жолтовский (генплан выставки, павильон «Шестигранник»), И.А. Фомин, К.С. Мельников (Павильон «Махорка») и т.д. Многие из объектов, предложенных для участия в выставке, киоски стали объектами городского пространства, например цветочный киоск для экспозиции Туркестан по проекту Ф.О. Шехтеля, а некоторые павильоны были растражированы по всему Союзу [7, С. 104-115].

Точкой отсчета становления теории временной, мобильной архитектуры, кинетических систем можно считать середину 1960-х годов, когда архитектор-теоретик Седрик Прайс, в противовес все еще актуальному функционализму впервые в своих концепциях рассматривал изменимость города, временность его существования, а архитектуру определял как что-то незаметное, «вроде водопровода», но сохраняющее способность связывания элементов – анти-архитектуру. По мнению Прайса «архитектура – слабый и неэффективный исполнитель, потому что при своей монументальности она всегда приходит последней». «Признание ничтожности архитектуры позволит ей функционировать как системе связей, которые генерируют разнообразные виды деятельности». Его проект Fun palace (1964 г.), рассчитанный на 10 лет, содержал идею, что архитектура не должна быть заключена в капитальное здание, а, наоборот – оставаться мобильной, адаптивной и многократно используемой, что впоследствии было реализовано в проекте Центра Помпиду в Париже (арх. Ренцо Пьяно и Ричард Роджерс). Размышления о временности и капитальности в городском пространстве привели Прайса к концепции «non-plan» – отказа от планировочных законов в градостроительстве и создания свободных зон, которые должны всегда оставаться пустыми или застраиваться зданиями, которые при моральном устаревании бы уничтожались, уступая место архитектуре новых социальных запросов [14].

В 1988 году социолог Джон Урри, под впечатлением от идей Прайса, предложил рассматривать пространство состоящим из множества движущихся элементов, включая различные «геометрические силы», а в 2012 году разработал парадигму мобильностей как основу формирования мобильных миров (мобильной городской среды, предметной среды и т.д.), основанной на выстраивании вероятностей в организации пространства, создании набора опций пространства, а «конкретные объекты среды предоставляют возможности и оказывают сопротивление, при условии что люди – это чувствительные... и мобильные существа» [13, С. 141].

Одновременно с Седриком Прайсом критика философом Жаком Дарридой архитектуры, создающейся на основе отрицания функционализма или историзма легла в основу теории деконструктивизма, исходя из которой австрийская архитектурная группа Куп Химмельб(л)ау предложила концепцию здания-люфта, идея пустого пространства которого содержит в себе потенциал использования и реконструкции для будущих пользователей, предоставляя им возможности, а не функцию. «Павильоны должны быть упорядочиваемы активностью пользователей, а не замыслом архитектора» [1]. В архитектурном исполнении в 1965 году концепция здания-люфта представляла собой большие пустые павильоны без заложенной идеи и функционального назначения.

Питер Эйзенман – другой практик деконструктивизма – связывал свои концепции с идеями Жака Дерриды, воспринимая деконструкцию как метафору в формообразовании. В 1970-80-е годы архитектор формулирует идеи семиотической игры – создания состояния аффекта, архитектуру ауры, которая предполагает иную концепцию структуры, основанной на неопределенности [8, С. 109]. Проект «House 11A» (1978-1980 гг.) описывает эту идею, дополняя ее формированием архитектурной формы во временном и декомпозиционном модусе, то есть видимом как нечто, выбранное из беспорядочного набора неопределенных пространственных сущностей и приведенное архитектором к простоте. Во многом идеи Эйзенмана перекликались с проектами Бернара Чуми, в частности парка Ля Виллет в Париже (1979-1989 гг.), соавтором которого является Жак Даррида. В проекте парка реализована концепция «архитектуры

без начала и конца», «архитектуру наслаждения», создающую новый подход к архитектурной форме [8, С. 114]. Данная концепция соотносится с идеями группы Куп Химмельб(л)ау и перекликается с социальными аспектами идей Урри.

Независимо от теории деконструктивистов в среде японских архитекторов (К. Кикутаке, К. Курокава, К. Танге, Ф. Маки, Я. Сакакура, К. Маекава и критик Н. Кавадзоэ) под влиянием местной культуры и идей связи с природой развилась концепция метаболизма. В её рамках структура «пространство-город» делится на пространственные и временные модульные и ячеистые составляющие. Хрестоматийным примером метаболизма является Башня «Накагин» в Токио по проекту К. Курокавы 1968 года, однако манифест метаболизма и проявления идей было осуществлено во время ЕХРО в Осаке в 1970 году, где куратором и автором павильона «Башня солнца» был Кензо Танге.

В 60-х годах под влиянием левых убеждений Хиппи – субкультуры американский архитектор Стив Баер создал поселение из полусферических жестяных хижин «Дроп-Сити» в Аризоне, где заложил принципы максимальной мобильности в архитектуре, отрицающей постоянство как противоположность свободе и пропагандирующей возврат к природе.

В отечественной науке в 1970-х годах Гутновым А.Э. и Лежавой И.Г. город был переосмыслен как 3 иерархически расположенных компонента: каркас – наиболее устойчивая улично-дорожная сеть, обновление которой проходит в течение столетий; ткань – капитальные сооружения, изменяющиеся в течение десятилетий и плазма – временное наполнение городского пространства – павильоны, киоски, рынки, которые меняются не реже чем в 5 лет, практически не влияют на изменения градостроительной ситуации, но восприимчивы к социальным проблемам.

В 80-е, в период развития компьютерных технологий и информации, становления кибернетики, как самостоятельной науки в архитектуре, появляются теории, тесно связывающие развитие города с мобильностью, динамизмом, неконтролируемой изменчивостью, например, проекты самопреобразующихся городов британской группы архитекторов Архигрэм, в сотрудничестве с Седриком Прайсом – Plug-in City (Город интеграции), Walking city (Шагающий город), Computer city (Компьютерный город), Underwater city (Подводный город). Проект «Живой город» (1963 г.) демонстрировал городское пространство, актуальное для жителей, лишённое капитальных зданий, дорог, без правил организации генпланов фасадов и стилистического анализа.

В конце 1980-х годов философ-постструктуралист Жиль Делез высказал идею, что архитектура – не вещь, а абстрактная, изменчивая и ускользающая топологическая структура. На этой основе архитектор Стефен Перелла разработал идею топологических импульсов архитектуры. Он предполагал, что пока архитектура не пропитается каждодневной жизнью, она не анимируется [8, С. 288]. Результатом стал проект гипероболочки самовозникающего пространства.

В конце XX-начале XXI века архитектор Чарльз Лендри описал современное состояние в философии архитектуры как уплотнение субъективно воспринимаемого времени ввиду резкого повышения интенсивности городской жизни. В своем исследовании этого феномена он пишет: «Новая ментальная география не устойчива – слишком много информации упаковано на коротких отрезках времени. Мобильность все больше уплотняет время, заставляя переживать его физически...». А в работе «The Time Squeeze», где рассматриваются темпоральные проблемы в обществе, опорную стабилизирующую функцию он видит в ритмичном преобразении среды, которое держит равновесие в развитии города. В современном восприятии, время и пространство являются ценным ресурсом и инструментом архитектора, а временность, по его мнению, необходимо определять как параметр устойчивого развития [8].

В 2000-х годах на пересмотр векторов развития городского пространства начинает влиять массовый доступ в Интернет, вытесняющий жителей с городских улиц и лишаящий города социальных связей. В этих условиях американский теоретик архитектуры Уильям Митчелл на основе концепции «Права на город» социолога Анри Лефевра высказал теорию «диверсификации пространства», которая предполагает в рамках фрагмента города обеспечение человека всеми потребностями на основе создания портативных средств, в том числе электронных [11, С. 219]. Архитектурным примером реализации данной теории нам представляется проект группы MVRDV «Container city».



В это же время ВА как направление в типологии стало основой развития фестивальной архитектуры, областью архитектурного творчества. Так, галерея Serpentine ежегодно приглашает архитектора – лауреата Прицкеровской премии воплотить свои концепции в сезонном павильоне. Отдельно необходимо отметить Шигеру Бана доказавшего способность изначально не строительных материалов выступать в качестве конструктивного каркаса. Также архитектор создал прецедент архитектуры исключительно как объекта с коротким сроком службы (временный кочующий музей на Гудзоне из картонных труб и контейнеров).

В последние годы развитие ВА в городе, территориях временного использования, временный урбанизм были исследованы в работах берлинской группы архитекторов Urban Pioneers. Большой вклад в изучение современной теории ВА, описанию отдельных концепций и примеров сделал Роберт Кроненбург – с 1995 года автор почти 30 книг о временной, мобильной, гибкой и эфемерной архитектуре. Его труды объединили в систему временные и мобильные сооружения. Обобщает теоретическую базу ВА и сборник статей «Time-based architecture able to withstand changes through time», посвященный архитектурным объектам, способным к изменению во времени. Также здесь в теорию архитектуры вводится термин «Time-based architecture» (ТВА) – архитектура, реагирующая на изменения в окружении, которую часто сравнивают с интерактивной архитектурой. Активно ТВА исследовал Дэвид Холл, который соотносит временное в архитектуре с видеоартом и светодизайном [4].

В результате анализа творческих исследований и концепций в области ВА было выявлено несколько подходов в определении роли времени и временности на различных уровнях архитектурного знания и практической деятельности. Время, по большей части, рассматривается как количественный и качественный фактор изменения города – пространства – архитектуры, часто зависящий от запросов человека, однако, до конца XX века не рассматривается как самостоятельное понятие.

Анализ современного опыта в области ВА общественного назначения выявил ряд признаков временности сооружений, которые представляют как общемировые тенденции, так и авторские подходы.

В ходе анализа теоретических концепций было определено, что ВС выступают в роли городской «плазмы» – обновляемого и изменяемого компонента уличной среды. Однако не только такие объекты могут быть временными. Множество капитальных зданий и сооружений выполняют функции временного и периодического использования, например те, где регулярно происходит обновление внутреннего пространства и программы, в частности выставочные пространства. ВА используется для организации интерьерного пространства по принципу павильон внутри павильона. Таков деревянный павильон часов Hermes La Montre, созданный Тойо Ито для выставки в Швейцарии или павильон Египта на Expo-2010 в Шанхае (архитектор Заха Хадид).

Следующим признаком временности является характер расположения относительно места. Сюда относятся мобильные сооружения, которые могут быть демонтированы, перенесены и повторно собраны. Павильон Nomiya (архитекторы Laurent & Pascal Grasso) – ресторан площадью 63 м<sup>2</sup>, установленный на крыше художественного центра Токийский дворец в Париже в 2009 году с видом на еще одно ВС – Эйфелеву башню – одна из иллюстраций данного признака временности. Поднятый с помощью башенного крана как цельный объект, этим же способом он позднее перемещался и на другие крыши города. Более известный пример мобильного ВС – шоу-рум Ily push button house (архитектор Adam Kalkin), площадью 44,6 м<sup>2</sup> – контейнер, который при нажатии кнопки раскрывается в интерьер квартиры. Впервые установленный на улице Венеции в рамках Биеннале 2007 года, павильон затем перемещался по всей территории Европы.

Быстрота возведения и экономичность эксплуатации ВС порождает в последнее время множество оригинальных одноразовых временных структур, которые после эксплуатации на уникальных массовых и творческих мероприятиях будут разобраны и как правило не собраны вновь, чтобы создать длительную память о событиях, избежать повторения. Например, архитектор Мартин Фишер создал концертные площадки для Rolling Stones, U2 и Pink Floyd. Конструкция под названием «Большой взрыв» для Rolling Stones 2005 года представляла собой сборный каркас со встроенными проекторами,

созданный на основе «декадентской живописи и декора оперного театра XIX века» [5, С. 174]. Сюда же можно отнести тематические ВС на лондонском фестивале архитектуры, навес из надувных шаров и ткани для фестиваля *With the Wind* в китайском Шеньчжэне в 2009 г., ВС на российских фестивалях архитектуры «Архстояние» (с 2006 г.), «Города» (2006-2013 гг.) и др.

Временные материалы – тоже признак временности. К таким ВС относятся объекты, состоящие из материалов, в т.ч. и не строительных, которые легко сломать и разрушить; разовых и перерабатываемых; недлительного использования, легких, полупрозрачных или тонких – бумага, картон, тростник, солома, стекло, лед, дерево, вода, свет, мыльные пузыри, а также вторсырье и мусор. Экспериментальное сооружение *Cloud cities / Air-port-city* архитектора Tomas Saraceno представляет собой навес из нескольких скрепленных вместе воздушных шаров, символизирующих парящие города. Другим примером служит выставочный павильон 2008 г. в австрийском Граце *Moderato Cantabile*, площадью 80 м<sup>2</sup>, созданный из обрезков металлических листов и арматуры. Примечательно, что объект стал центром общественного пространства примыкающего к зданию музея в стиле Барокко и переходом, встроенным в окно, соединенного с ним. В результате такого соседства, данное пространство стало местом диалога эпох, культур и традиций.

Потенциал бумаги и картона как полноценных строительных материалов раскрылись в проектах японского архитектора Шигеру Бана. В 2007 году рядом со знаменитым римским акведуком Пон-дю-гар во Франции им был реализован временный пешеходный мост, на основе несущих картонных труб, ступеней из макулатуры и фундамента из деревянных ящиков с песком. Данное сооружение функционировало в течение 6 недель в разгар туристического периода, затем было разобрано. Другие его проекты демонстрируют при необходимости долгие сроки службы подобных сооружений – картонные жилые и общественные временные центры для пострадавших после землетрясения в Кобе в 1995 г., рассчитанные на 3 года, существуют до сих пор.

Наконец может быть выделен такой признак временности как кинетическая составляющая. Его иллюстрируют ВС, которые изменяют со временем форму, состав, состояние и положение – гибкие пространства, открытые системы из строительных лесов, ледяные сооружения, растения, разъедающие металлы и создающие фасады, интерактивные объекты итп. Такова и гиперболоидная градирня на фестивале «Архстояние» 2009 года – 15-метровое сооружение из лозы и сена, которое в соответствии с замыслом с течением времени начало заваливаться и изменяться в пропорциях.

Таким образом, временность сооружений не всегда определяется коротким сроком их существования и иногда ввиду своих конструктивных особенностей, высоких эстетических характеристик и потребительской необходимости ВС становятся постоянными, как большинство павильонов международных выставок начиная с Эйфелевой башни. Не задается срок эксплуатации у мобильных сооружений. Поэтому для классификации ВС могут быть использованы и другие характеристики.

Объекты городской инфраструктуры и элементы городских событий можно классифицировать по характеру временной эксплуатации на заданной территории на сооружения однократного и одноразового использования (эфемерные (из не строительных материалов) или стационарные) либо сооружения многократного использования (мобильные, кинетические). По периодам временного функционирования ВС подразделяются на сооружения круглогодичного; сезонного использования; с суточной периодичностью использования (убирающиеся на ночь рыночные структуры); разового использования на время мероприятий; эфемерные сооружения; одноразовые сооружения из не строительных материалов, утилизируемые; задуманные как временные: по своим характеристикам, по большей части, относятся к капитальным сооружениям, но устанавливаются на территории на заданный срок.

Неотъемлемую часть ВС составляют мобильные сооружения, типология и формообразование которых рассматривались в исследованиях Кроненбурга Р. [2, 3] на основе которых была сформирована классификация по характеру мобильности:

- Сборно-разборные мобильные сооружения: каркасно-панельные, панельные (бескаркасные), смешанной конструкции;

- Мобильные здания из объемных пространственных элементов: контейнеры; трейлеры; вагоны-дома; фургоны, изготовленные на автомобильных прицепах;

- Трансформирующиеся мобильные здания: складные конструкции (жесткие, мягкие), раздвижные конструкции.

По степени мобильности временные сооружения по отношению к территории размещения подразделяются на мобильные, маломобильные и стационарные. По мнению Нейфаха Л.С. степень мобильности определяет количество элементов обслуживания, например, палаточные детские лагеря функционируют стационарно несколько месяцев, базовые – несколько лет, а крупные детские лагеря-поселки – десятилетия.

Если рассматривать объекты ВА относительно способа мобильности, то Кроненбург Р. [2] выделяет 3 типа, исходя из конструктивных особенностей и возможностей легкого монтажа:

- не нуждающиеся в сборке сооружения, которые после транспортировки сразу включаются в эксплуатационный процесс (павильон Nomiya, OMD prefab show house). Некоторые примеры таких сооружений построены на колесах или передвигаются на тележке и потому существуют на грани между архитектурой и транспортом;

- предполагающие промышленное производство элементов конструкции здания или сооружения, которые перевозятся в разобранном виде, а затем собираются на территории размещения. Такие сооружения обладают творческим потенциалом, сложной формой и композицией, высокими эстетическими характеристиками. К данному типу относятся выставочные павильоны, сооружения ЕХРО и Галереи Serpentine, архитектурные сооружения Международных мероприятий, концертов, деревянные арт-объекты архитектурных фестивалей и т.п.;

- состоящие из системы модульных фрагментов, которые легко транспортируются и собираются непосредственно на территории – здания из контейнеров, пространственных стержневых конструкций, тентовые покрытия. Этот тип предполагает максимальную адаптивность к изменениям внешней среды, а значит способность к трансформации.

По конструктивно-типологическому принципу временные сооружения подразделяются на блочные, контейнерные, сборно-разборные каркасные, из линейных и плоских элементов, панельные и пневматические (воздухоопорные и воздухоносимые) [11].

По наличию фундамента ВС подразделяются на бесфундаментные, фундаментные мелкого заглубления, фундаментные на винтовых сваях, анкерные и балластные (для воздухоносимых).

Объекты ВА характеризуются большей, чем у капитальных зданий, вариативностью используемых материалов. Традиционными являются дерево, металлические конструкции, составляющие остов сооружений, также тентовые и тканевые покрытия, пластики, композитные материалы облицовки, сэндвич-панели, сайдинг, пластик. В последнее время в качестве материалов, в том числе и для несущих конструкций применяют бумагу, картон, блоки из сена, ветки и лозу, материалы вторичного использования. Все эти материалы при включении цветового и светового дизайна формируют широкий спектр декоративных приемов оформления фасадов, включающий в себя суперграфику и орнаменты, созданные с помощью ритмов материалов («Арка» Бориса Бернасconi, Павильон в Ганновере Шигеру Бана). Однако в целом, для фасадных решений объектов временной архитектуры характерен экономный подход к фасадным решениям, а образ и композиция зависят от функционального назначения ВС.

Переходя к градостроительным параметрам и классификациям ВС, следует отметить, что для ВС городских мероприятий характерно создание пространственного каркаса, связывающего объекты ВА в единую транспортно-пешеходную сеть, тогда как ВС – объекты городской инфраструктуры играют роль «городской плазмы», или «подвижного наполнителя неподвижного окружения».

Объекты ВА располагаются одиночно или группами (торговые ряды, рынки) и тяготеют к зонам потребительской активности. Для объектов общественного, развлекательного – расположение в рекреационных или в пешеходно-общественных зонах (например, сезонный павильон Temporary Kunsthalle, Berlin 2008 установлен на площади перед Рейхстагом).

В целом, варианты размещения ВС в городской среде можно свести к следующим:

1. *Сооружение-ограждение* формирует преграду, стену, скрывает и создает границы между различными зданиями и территориями. Например, торговые ряды, блокированные павильоны, ограждают рынки, расположенные периметрально контейнеры замещают собой привычные ограждения.

2. Многие сооружения торговли формируют *сооружения-площади*, которые могут быть организованы в виде блокированных и рассредоточенных радиально ВС (воскресные рынки, сезонные рынки) или в качестве единственного крупного сооружения (Олимпийский центр на Трафальгарской площади в Лондоне летом 2012 года).

3. Типология торговых рядов, восточных базаров, блокированных линейно вдоль улиц, формирует композицию характерную для галерей и пассажей и представляет собой *сооружение-улица* (например, крытая выставочная галерея на Крымской набережной парка Музеон в Москве).

4. Для большинства городов России с преобладанием сооружений торгового назначения и жестким регламентом расположения ВС в городской среде единственным направлением развития, нацеленного на потребительскую активность жителей стало совмещение торгового павильона или киоска с остановками общественного транспорта – *сооружение-остановка*.

5. *Сооружение-перекресток* фиксирует пересечение улиц. Этот средообразующий принцип также характерен для сооружений торгового назначения, в основном для сооружений «Горпечати». Такие сооружения тяготеют к интенсивным пешеходным маршрутам, что также определяется потребительской активностью. Показательным примером сооружений не торгового назначения следует выделить павильоны и общественные пространства, в т.ч. сезонная трибуна, ставшая центром композиции и регулирующая потоки пешеходов на Таймс-сквер в Нью-Йорке (архитектор Ян Гейл).

6. *Сооружение-вставка* выступает как дополнение к непрерывной застройке. Такие ВС могут формироваться в промежутках между зданиями, нависать над въездными арками, располагаться на городских пустотах и пустырях. Например, павильон галереи Nairwood, созданный архитектурной группой «ба architects» в Лондоне. Сооружение соединяет стоящие рядом многоэтажные кирпичные жилые здания в диалоге со своим деревянным резным фасадом, преобразуя фрагмент городской среды в общественное пространство. Сооружение-вставка может формировать заполнение общественного здания – павильон Bubble в Музее National Mall, Вашингтон 2010-2012 гг., созданный Diller Scofidio+Renfro, представлял собой мембранное сооружение площадью 1208 м<sup>2</sup>, заполняющее внутренний двор и открытые пространства первого этажа.

7. *Сооружение-скульптура* характеризует множество объектов ВА творчества, например, представленные на EXPO павильоны стран участниц в 2010 году в Шанхае: Дании, архитектурное бюро BIG, павильон в виде спиралей пешеходных террас; Великобритании – мультимедийный Seed Cathedral и Испании – павильон параметрического формообразования, фасад которого сделан из натуральных материалов – лозы и веток.

8. Среди новых средообразующих приемов использования ВС – это *сооружения-паразиты*, которые умышленно или из-за естественных причин выступают на контрасте с окружающей застройкой, нарушая ее эстетические характеристики. На протяжении долгого времени торговые павильоны, киоски и ларьки, в частности элементы рынков, характеризовались именно как неблагоприятные элементы городской среды, что отразилось на их количестве.

9. *Сооружение-акцент (сооружение-доминанта)* как средовые характеристики наделяют ВС визуальными преимуществами, по отношению к капитальной застройке (Эйфелева башня). Используя средообразующие характеристики, такие ВС могут усиливать «дух места», улучшать пространственные характеристики и капитализировать пространство.

10. *Сооружения на воде*: плавучие микро-отели, общественные пространства и спортивные центры, например, бассейн Vadeschiff, Берлин, сооружение, представляющее собой группу деревянных террас на понтонах, заканчивающиеся небольшим бассейном. Сооружение также функционирует в зимнее время – все эти пространства закрываются пневматической оболочкой. Развитие набережных, где активным наполнением выступают временные сооружения, повлекло за собой их взаимодействие с водой, в результате, стали создаваться павильоны на воде, террасы летних кафе и ресторанов, танцевальные площадки, игровые павильоны (павильон в Роттердаме, в виде композиции из 3 геодезических куполов; бумажный мост Шигеру Бана во Франции; павильон-облако на Expo-2002 в Швейцарии – эфемерное сооружение, формирующееся на основе пара).

11. *Сооружения под землей* (например, заполнения пешеходных переходов)

12. *Сооружения на крыше* (ресторан Nomiya в Париже, модульный ресторан Park Associati на крыше исторического здания в Милане, Rooftop remodelling на Falkestrasse в Вене, архитекторы Coop Himmelb(l)au, голубятни и др.).

Обзор исторического, теоретического и практического опыта свидетельствуют о развитой типологии временной архитектуры и ее потенциале для решения насущных проблем и развития городской среды. Архитектурное сооружение как элемент международных выставок и городских событий обладает значительным творческим потенциалом, изначально может быть задумано как временное с возможностью дальнейшей разборки и сборки. Этот процесс генерирует постоянный спрос на подобные события в городском пространстве, а временное состояние архитектуры творчества создает новые типологические и конструктивные схемы и моделирует новый образный язык архитектуры. Теоретические исследования в области ВА подтверждают актуальность темпорального аспекта в архитектурной науке – время определяется как фактор изменения в городском пространстве, часто зависящий от запросов человека, однако не рассматривается как самостоятельное понятие. Обзор практического опыта использования временных сооружений для создания объектов различного функционального назначения свидетельствует о развитости типологии, соразмерной по своим характеристикам с капитальными сооружениями, и в дальнейшем способные заменить их, что подтверждается теорией «временного урбанизма», с помощью которого преобразуются территории временного использования и пространства, нуждающиеся в капитализации и ревитализации.

ВС являются наиболее отзывчивыми к потребностям населения: обеспечивают пешеходную доступность при нехватки стационарных торговых площадей; создают необходимую инфраструктуру парков и скверов для создания комфортной среды пребывания; обслуживают массовые мероприятия и участвуют в формировании жилой и общественной среды при ЧС, как элемент быстрого реагирования. ВА может различными способами эффективно заполнять городские «пустоты», выступать самой доступной площадкой творческого манифеста как молодых, так и зрелых архитекторов, обладает способностью выразить современные идеалы гибкости, легкости и мобильности.

### Список библиографических ссылок

1. Goessel Peter. Coop himmelb(l)au. Complete works 1968-2010. Cologne : Taschen, 2010. 528 p.
2. Kronenburg Robert. Architecture in Motion: The History and Development of Portable Building. Abingdon: Routledge, 2013. 328 p.
3. Kronenburg Robert. Transportable environments. Oxford : Taylor & Francis, 2013. 224 p.
4. Leupen Bernard. Time-based Architecture: Architecture Able to Withstand Changes Through Time. Rotterdam : 010 Publishers, 2005. 272 p.
5. Temporary architecture NOW! London : Taschen, 2011. 416 p.
6. Балакина Л. А. Градостроительные аспекты мобильных поселений в библейских текстах // Европа-Азия. Сб. тр. XX-й МНК «Современные концепции научных исследований». М. : Eurasian Union of Scientists, 2015. С. 3–18.
7. Временная архитектура парка Горького: от Мельникова до Бана. М. : ЦСК «Гараж», 2012. 144 с.
8. Добрицына И. А. От постмодернизма к нелинейной архитектуре: архитектура в контексте современной философии. М. : Прогресс-Традиция, 2004. 416 с.
9. Журавлев М. Ю. Категория времени в теоретических концепциях архитекторов // Известия КГАСУ. 2012. № 3 (21). С. 7–12.
10. Израилев Е. М. Мобильная архитектура вчера, сегодня... послезавтра. СПб. : Стройиздат, 1997. 320 с.
11. Митчелл Уильям. Я ++: человек, город, сети. М. : Strelka press, 2012. 328 с.
12. Павильоны СССР на Международных выставках. М. : Майер, 2013. 224 с.
13. Урри Джон. Мобильности. М. : Практикс, 2012. 576 с.
14. Шевченко А. Седрик Прайс: антиархитектор № 1 // Русский журнал : ежедн. интернет-изд. 08.02.2013. URL: <http://www.russ.ru/pole/Sedrik-Prajs-antiarhitektor-1> (дата обращения: 23.10.2017).

**Giziatova L.R.** – head of workshop of strategic research

E-mail: [lilya.giziatova@gmail.com](mailto:lilya.giziatova@gmail.com)

**LTD «Architecturnii desant»**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Bauman st., 19, of. 301

**Krasnobaev I.V.** – candidate of architecture

E-mail: [tia.kgasu@gmail.com](mailto:tia.kgasu@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Temporary public architecture: premises, history, classification and potential of modern development**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the article summarizing the master's thesis of the graduate of KSASU in 2014 was the justification of the prospects for the development and implementation of temporary architecture in public spaces of cities in spite of the state policy in Russia to eliminate temporary structures from central urban areas.

*Results.* On the basis of generalization of theoretical, historical preconditions and modern international experience in the use of temporary public facilities, the urgency of their development in modern quality is proved, the typology of town-planning, functional and composition solutions is revealed, the potential of modern composite solutions enhancing the quality of public spaces in Russian cities is shown.

*Conclusions.* Temporary architecture is the most responsive to the needs of the population in the field of trade and leisure, can in various ways effectively fill the city «emptiness», act as the most accessible platform for the creative manifesto of architects, and has the ability to express the modern ideals of flexibility, ease and mobility.

**Keywords:** temporary architecture, temporary public buildings, pavilions, architecture of public events.

#### **References**

1. Goessel Peter. Coop himmelb(l)au. Complete works 1968-2010. Cologne : Taschen, 2010. 528 p.
2. Kronenburg Robert. Architecture in Motion: The History and Development of Portable Building. Abingdon : Routledge, 2013. 328 p.
3. Kronenburg Robert. Transportable environments. Oxford : Taylor & Francis, 2013. 224 p.
4. Leupen Bernard. Time-based Architecture: Architecture Able to Withstand Changes Through Time. Rotterdam : 010 Publishers, 2005. 272 p.
5. Temporary architecture NOW! London : Taschen, 2011. 416 p.
6. Balakina L. A. Urban aspects of mobile settlements in Bible texts. // Europe-Asia. dig. of art. of XX International scientific conference «Modern concepts of scientific research». M. : Eurasian Union of Scientists, 2015. P. 3–18.
7. Temporary architecture of the Gorky park: from Melnikov to Ban. M. : CSK «Garage», 2012. 144 p.
8. Dobricina I. A. From postmodernism to nonlinear architecture: architecture in the context of contemporary philosophy. M. : Progress-Tradiciya, 2004. 416 p.
9. Juravlev M. U. Category of time in theoretical concepts of architects // Izvestiya KGASU. 2012. № 3 (21). P. 7–12.
10. Izrailev E. M. Mobile architecture: yesterday, today... day after tomorrow. SPb. : Stroiizdat, 1997. 320 p.
11. Mitchell William. Me++: human, city, network. M. : Strelka press, 2012. 328 p.
12. Pavilions of the USSR at the International Exhibitions. M. : Maier, 2013. 224 p.
13. Urry John. Mobilities. M. : Praxis, 2012. 576 p.
14. Shevchenko A. Cedrik Price: antiarchitect № 1 // Russkiy zhurnal: daily internet-edit. 08.02.2013. URL: <http://www.russ.ru/pole/Sedrik-Prajs-antiarhitektor-1> (reference date: 23.10.2017).

УДК 72.01

**Зайнуллина А.М.** – проектировщик

E-mail: [adelina\\_design@mail.ru](mailto:adelina_design@mail.ru)

**ООО «СтройЭлитСервис»**

Адрес организации: 420137, Россия, г. Казань, ул. Маршала Чуйкова, д. 87-88

## Типология современных архитектурных решений рынков

### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – создание классификации современных рынков по их объемно-планировочной структуре, изучению зарубежного опыта в проектировании рыночных пространств, выявлении новых типологий, сложившихся путем симбиоза нескольких архитектурных единиц.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в формировании классификации рыночных пространств, выявлении новой типологии и использовании их при проектировании торговых и рыночных пространств.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в создании нового подхода при проектировании, путем симбиоза нескольких функций пространства и формирования нового архитектурного пространства рынков.

**Ключевые слова:** торговый центр, общество потребления, ярмарка, традиции, торговля, архитектура, современное торговое пространство.

В статье рассматривается влияние современных торговых пространств на структуру и облик города. Создание новой типологии пространства торгового центра, отвечающего потребностям, основанного на историческом аспекте, заключающего в себе возрождение традиционной торговли. Переосмысление роли рынков в градообразующем и социальном плане.

Середина XX века ознаменовалась для Российской экономики как время начала динамично и стабильно развивающейся отрасли. К окончанию столетия современные молы и гипермаркеты стали насыщать города, а здания продовольственных рынков и базаров в худшем случае сносили, а в лучшем перепрофилировали. Но уже к началу XXI века стала возрастать тенденция здорового образа жизни и употребления натуральных продуктов. Рынок как типология стал активно возвращать утраченные позиции: реконструируются старые здания, строятся новые, при этом понятие «рынок» трактуется максимально широко [1].

За прошедшие 5-7 лет в крупных Российских городах наблюдается тенденция по сокращению строительства крупных торговых центров. Процесс глобализации в экономике и в обществе зачастую негативно сказывается на городской среде и городском планировании, так как места торговли представляют собой центр событий, и притяжением большого числа людей. Вопрос о стихийном появлении торговых площадей стоит очень остро. Торговые пространства становятся яркими ориентирами в структуре города, а также коммуникационными узлами и общественными пространствами [2]. Современные города имеют огромное количество торговых площадок, каждая единица торгового центра идентична другой с визуальной и функциональной точки зрения, их архитектура и визуальный облик безликий. Живое общение и ощущение контекста места, его историческая ценность, приобретают все большую ценность на фоне глобализации и урбанизации городов. Такими характеристиками обладают городские рынки. Моно-функция совершения покупок, утрачивает свою актуальность, современный городской потребитель хочет идентифицировать себя с местом: чувствовать колорит, дух места, и получать живое общение с людьми. Роль рынка ранее и сейчас состоит в том, чтобы быть катализатором экономической и социальной коммуникации сообществ.

В нашем понимании рынок - это шумное и беспорядочное место, которое не несет в себе отражение современного и комфортного уровня жизни. Встает задача, переосмысления роли рынков в городской структуре и придания им того колорита и живого действия, которые существовали сотни лет назад.

Многие девелоперы говорят сегодня о рынках, размышляя об их строительстве, а руководства функционирующих торговых пространств – о приоритете и смещении супермаркета рыночными площадками. В странах Азии, Европе и США существуют рынки, успешно внедренные состав торговых центров, от районных до окружных [3].

На примере крупных городов видно, что такая проблема, как безжизненность городских центров, решается с помощью возвращения в центр города оживленного полифункционального рыночного пространства. Рынок – это идеальный вид пространства для розничной торговли, рыночная торговля появилась тысячи лет назад, и актуальна, по сей день. Исторически так сложилось, что на рынок люди приходили не только купить или продать товар, здесь происходили мощные социальные отношения, решались важные общественные вопросы, укреплялись связи, здесь можно было найти любой товар. В наше время рынки разнообразны по своему ассортименту: продовольственные, вещевые, строительные, универсальные. Так же рынки различаются по своей типологии: крытый рынок, ярмарочная площадь, стихийный, фестивальные рынки [1].

Так же одна из проблем современных торговых центров – это их архитектурный облик. Широкий спрос на товар и продукты меняет типологию зданий и художественно-выразительный облик. Современный магазин представляет собой большой по площади, быстро возводимый склад, обезличенная архитектура, не отражающая контекста, окружающего здания. Следствием подобного подхода к архитектуре торговых центров возникает тенденция к «стихийному» строительству торговых объектов-складов, которые не вписываются в существующую застройку, не отражают национальных особенностей, не демонстрируют пространственную организацию и художественный образ общественного здания [4].

В рамках данной статьи обращается внимание на формат современных рыночных комплексов, как на альтернативу стандартной концепции торгового комплекса. Существует мнение, что рынки – шумное и беспорядочное пространство, которое не отражает современный и комфортный уровень жизни.

Одно из решений проблем современных рыночных пространств – это изменение представления потребителя о торговле, потреблении и роли рынка. Встает задача в переосмыслении его роли в городской структуре. Одно из главных преимуществ районного «фреш-маркета» с точки зрения современного покупателя – близкие к рыночным цены на свежую, качественную продукцию, которую можно приобретать в гораздо более комфортных условиях. Современный рынок – это больше чем просто торговая функция, это место коммуникации, досуга и развлечения, там могут проходить мастер классы, организовываться кулинарные школы, сдаваться временное жилье для фермеров и т.д. Такие сложно запрограммированные общественные пространства – это новая гибкая современная культурно-коммерческая типология, которая может составить серьёзную конкуренцию привычным местам общественного досуга вроде музея, театра или кинотеатра.

Современные или обновленные рынки могут существовать не только, лишь реализуя продукцию, а за счет реорганизации режима функционирования и содержательной функциональной программы, превращающей рынок из коммерческого пространства в общественное культурное пространство.

Планировку рядов прилавков рыночных комплексов, по структуре, можно сравнить с городскими кварталами, поэтому при гибкой планировке, каждый из них может стать площадкой для организации новых видов функций: возможность организации разнообразных комбинаций и планировок торговых павильонов. Рассмотрим один из вариантов организации торговых рядов: несколько прилавков перекрытые деревянным настилом, – это однодневный рынок дачных продуктов летом, а зимой – место продажи носков и рукавиц. Один длинный ряд прилавков, накрытый одной столешницей, – это и подиум для показов, и длинный стол для празднования. Уже в вечернее время, на несколько часов каждый прилавок может превратиться в кулинарный мастер-класс, барную стойку, постамент для инсталляции современного художника.

Для спальных районов и жилых массивов можно разработать другую типологию рынка – очень дешёвый, социальный объект, преимущественно торгующий продуктами из городов Татарстана и некоторых других областей. Возможно, именно такой рынок необходим местным жителям. Он может быть выполнен из лёгких передвижных



прилавков, из которых нетрудно составить разнообразные конфигурации или освободить центральное пространство под мероприятия. Рынок также восполняет критический недостаток общественных пространств в спальнях районах: можно будет потолкаться, встретиться с друзьями, поесть в столовой, посмотреть бесплатное кино, а также выполнить мелкие семейные поручения – отдать в починку обувь, сделать новые ключи или маникюр [5]. Учитывая все вышеперечисленное можно сформировать таблицу типологий рыночных пространств (рис. 1-2).

На основе анализа проектного опыта рыночных пространств составлена следующая спецификация: Рынок, как новая функция здания – пример ревалоризации производственного здания, придания ему новой функции, путем реконструкции; Крытый рынок, это исторический рынок, который существовал в городе несколько веков, и для него создали конструкцию – навес, что в результате реконструкции оказалось интересным фасадным элементом; Рынок и площадь – это планировочное решение рыночного пространство, где запланировано не только здание рынка, но и торговая площадь для сезонных мероприятий; Рынок и жилье – новая типология торгового сооружения с жилой функцией; Современный рынок с национальным мотивом – данный вид рынков можно чаще всего встретить в странах Ближнего Востока, где историческая и современная архитектура строится в соответствии с местным колоритом, на фасаде мы можем наблюдать арабские узоры, в отделке могут использоваться характерные для местности материалы; Рынок-павильон – небольшое торговое помещение для реализации одной группы товаров, например в портовых городах западной Европы существуют рыбные павильоны на набережных, чаще всего это крытый ряд прилавков.

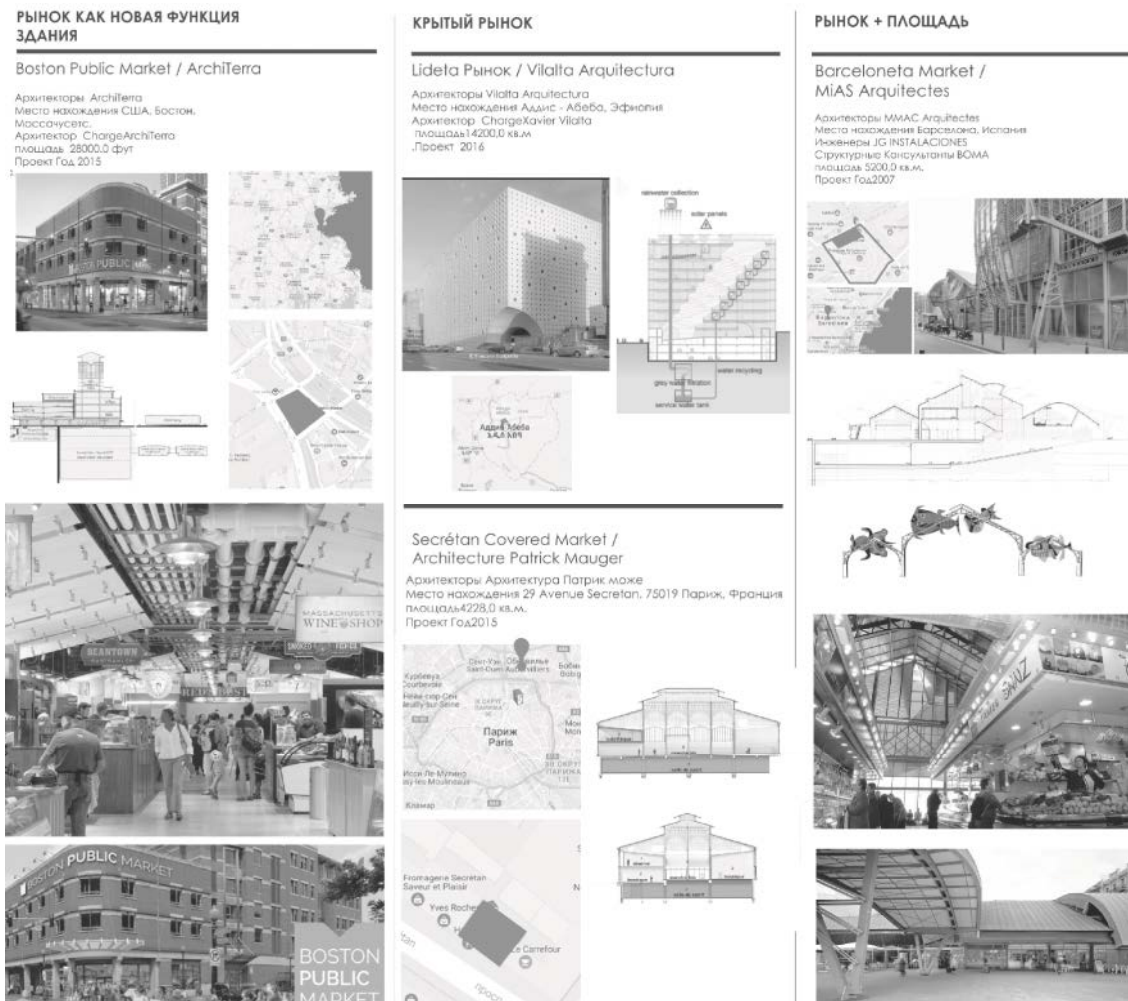


Рис. 1. Типология современных архитектурных решений рынков

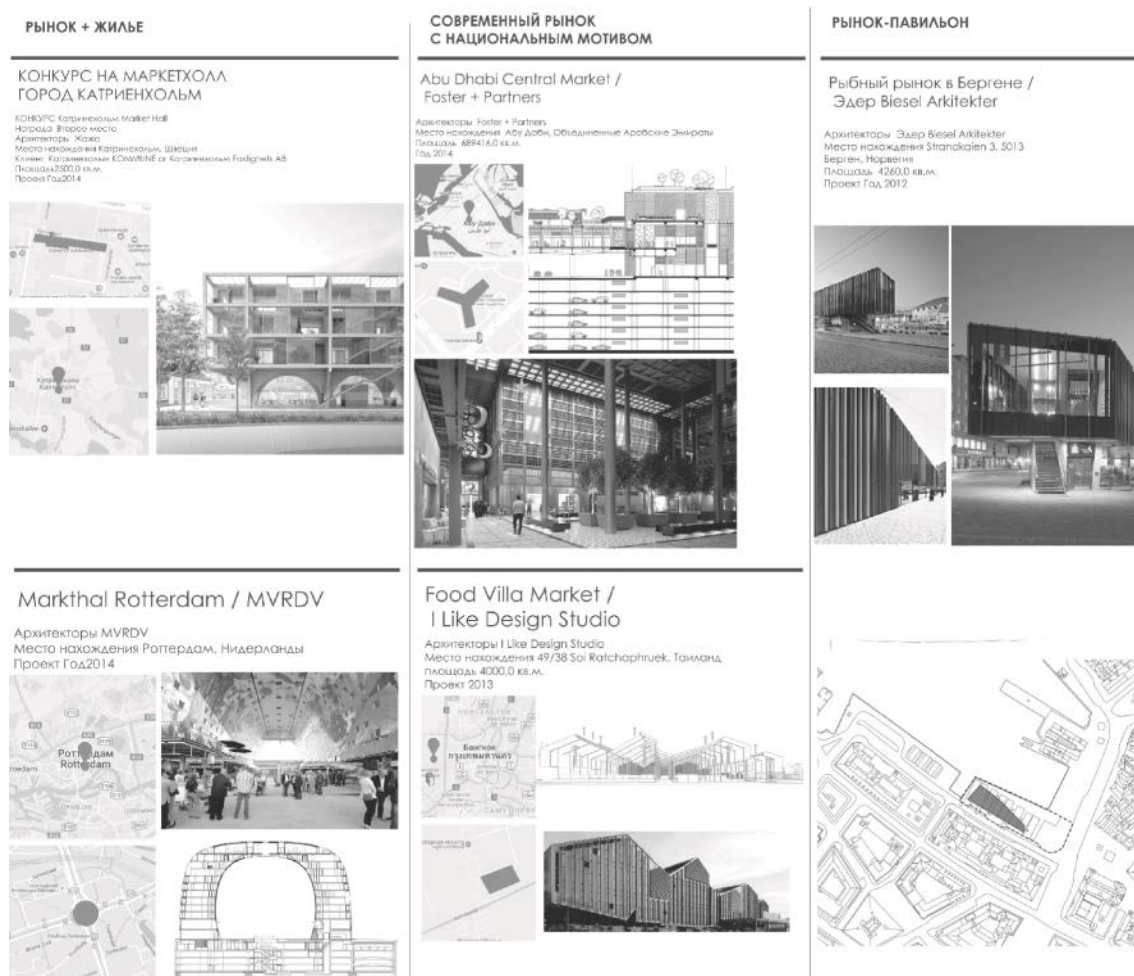


Рис. 2. Типология современных архитектурных решений рынков (приложение к таблице)

Подобная новая типология необходима для переосмысления торговли и потребления, а также для формирования облика современного магазина. Таким образом, появляется новый вид торговых помещений для традиционных национальных ярмарок в современной интерпретации

В рамках исследования проанализированы рынки во многих крупных городах: Париж, Стокгольм, Роттердам, Амстердам, Пекин, Барселона, Москва и Казань. Выявление основных градостроительных параметров мест расположения, влияющих на структуру объекта. Разработка принципиальных функциональных и объемно-планировочных схем с учетом проведенных исследований. Разработка рекомендаций по составлению технических условий для проектирования торговых пространств, для проведения традиционных ярмарок в различных градостроительных ситуациях [6]. Современному рынку не хватает интерактивности, здесь могли бы проводиться образовательные мастер-классы, где разбираются основы правильного питания, так же необходимо подключить рынки к глобальной сети доставки питания, открывать на базе реализуемой продукции тематические кафе и рестораны. Исследование показало, что рынки сегодня существуют во всем многообразии функционального состава и типологии. Сегодня рынок может совмещаться с любой другой функцией, при этом экономика сама формирует запрос, создавая уникальность объекта [7].

Таким образом, если в 20 веке здания рынков сносили или перепрофилировали, то 21 век обозначил совершенно новую тенденцию. На волне интереса к «зеленой» теме, рынок как типология стал активно возвращать утраченные позиции. Реконструируются старые здания, строятся новые, при этом понятие «рынок» трактуется максимально широко.

На примере города Казань можно рассмотреть историческую эволюцию торговых рыночных площадей. Многие из них уже утратили свою функцию, но сохранили свои

исторические названия. В начале XX века в Казани насчитывалось 17 площадей. Площади использовались для проведения сезонных торговых ярмарок, периодических воскресных торговлей, а многих из площадей служили для воинских парадов и учений. Для Казани исторически торговля является одним из градообразующих факторов. Великий Шелковый путь соединял города и страны, привносил новые течения, мысли и религиозные идеи. Ярмарки и рынки возникали в гаванях и на пристанях городов, и различались по разнообразию товара: существовали лесные, конные, степные, скотские ярмарки, в зависимости от товара работали по разной продолжительности [8].

Волжский путь развил экономику многих городов, сделал их крупными торговыми центрами. С появлением торговли в городах улучшились доходы возможности населения, вырос уровень их жизни, торговля стала основным источником дохода и процветания.

В истории Казани сохранилось много упоминаний о Казанской ярмарке на территории Гостиного Двора. Ярмарка могла функционировать в течении всего лета, Гостиный (Купеческий) остров был комфортным местом для проведения сделок. До 1552 года ярмарка в Гостином острове считалась крупнейшей на территории Поволжья [9]. Однако для ослабления влияния татарских купцов и казанского ханства, московский царь Василий III издал указ о переносе ярмарки в Нижний Новгород, несмотря на это, Казань по-прежнему привлекала торговцев. На тот момент, в 1858 году на территории Казанской губернии функционировало около 30 ярмарок (рис. 3).



Рис. 3. Современный и исторический вид рынков Казани

Гостиный двор явился мощным импульсом для появления торговой площади, которая меняла свои названия, но сохранила свою структуру до наших дней. При казанском ханстве она называлась «Ташаяк», до советского времени «Толкучий рынок».

Сенная площадь была торговой для татарской части города, тут располагался настоящий восточный рынок, он был застроен по периметру мечетями, доходными домами, гостиничными домами, мелкими лавками и общественными банями. Сенной базар упоминал в своих произведениях Габдулла Тукай и многие другие татарские авторы. А основной архитектурной доминантой Сенного базара и рыночной площади служила Сенная мечеть [10]. На иллюстрации можно увидеть, как выглядят исторические торговые площади в современной Казани.

Ярмарочные площади со временем обрастали зданиями, доходными домами, за ними строились жилые дома и мечети. Рыночные площади становятся градообразующим элементом, они создали структуру города, фрагменты которой сохранились в современном плане Казани [11].

Торговля в Казани имела свою эволюцию, развивалась в зависимости от политической ситуации и достигла своего максимального роста в советское время (рис. 4).



Рис. 4. Хронология эволюции торговли в Казани

Проанализировав исторические предпосылки развития торговли в Казани, можно сделать вывод- развитию Казани способствует торговля на протяжении истории существования города. На сегодняшний день остро стоит проблема облика и планировочной структуры торговых и рыночных пространств. Создание новой типологии возможно лишь при изучении истории развития торговли в регионе, учете традиций, а также основываясь на зарубежном опыте и совершенно новом для нас подходе. Необходимо переосмысление торговли и потребления, только таким образом возможно формирование облика современного магазина, и появления нового вида торговых помещений, традиционных национальных ярмарок в современной интерпретации.

### Список библиографических ссылок

1. Смирнова О. В., Хромов В. Я. Учреждения бытового обслуживания и общественные центры городов. М. : Стройиздат, 1973. 112 с.
2. Линч К. Образ города. М. : Стройиздат, 1982. 328 с.
3. Smith P. E. Shopping centers planning and management. New York. 195 с.
4. Zohlen G. Shopping-Malls. Stuttgart. 2010. С. 115–121.
5. Архитектура рынков: экономическая социология капиталистических обществ XXI века // cyberleninka.ru: научная электронная библиотека. 2017. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/architektura-rynkov-ekonomicheskaya-sotsiologiya-kapitalisticheskikh-obschestv-xxi-veka-1> (дата обращения: 07.08.2017).
6. Архитектура общественно-торговых центров в историческом ядре крупнейшего города // dissercat.com: Научная библиотека диссертаций и авторефератов. 2017 URL: <http://www.dissercat.com/content/architektura-obshchestvenno-torgovykh-tsentrov-v-istoricheskom-yadre-krupneishego-goroda-na-> (дата обращения: 30.08.2017)
7. Toissant J. Y. User, observer, programmer et fabriquer l'espace public. Losanne. 2013. 288 с.
8. Агеева Л. В. Суконка – исчезнувшая история // Казанские Истории. 2010. № 26. 8с.
9. Лебедев А. Рыбноярская площадь // Республика Татарстан: общественно-политическая газета. 2015. № 209. 5 с.

10. Баязитов А., Ибрагимова Р. Улица Московская // Казанские Истории. 2011. № 7. 4 с.
11. Иванова Е. А. Исторический обзор формирования Казанских городских рыночных площадей // Архитектон: известия вузов. 2012. № 40.

**Zainullina A.M.** – designer

E-mail: [adelina\\_design@mail.ru](mailto:adelina_design@mail.ru)

**LTD «StroyElitServis»**

The organization address: 420137, Russia, Kazan, Marshal Chuikov st., 87-88

### Typology of modern architectural solutions for markets

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the research is to create a classification of modern markets in terms of their volume-planning structure, study foreign experience in designing market spaces, identify new typologies that have emerged through the symbiosis of several architectural units.

*Results.* The main results of the research consist in the formation of a classification of market spaces, the identification of a new typology and their use in the design of trade and market spaces.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the architecture consists in creating a new approach in the design, by the symbiosis of several functions of space and the formation of a new architectural space of markets.

**Keywords:** shopping center, consumer society, fair, traditions, trade, architecture, modern trade space.

#### References

1. Smirnova O. V., Khromov V. Y. Institutions of consumer services and public centers of cities. M. : Stroyizdat, 1973. 112 p.
2. Lynch K. The image of the city. M. : Stroyizdat, 1982. 328 p.
3. Smith P. E. Shopping centers planning and management. New York. 195 p.
4. Zohlen G. Shopping-Malls. Stuttgart. 2010. P. 115–121.
5. Architecture of markets: economic sociology of capitalist societies of the XXI century // cyberleninka.ru: a scientific electronic library. 2017. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/arkhitektura-rynkov-ekonomicheskaya-sotsiologiya-kapitalisticheskikh-obschestv-xxi-veka-1> (reference date: 07.08.2017).
6. Architecture of public and commercial centers in the historical nucleus of the largest city // dissercat.com: Scientific library of dissertations and author's abstracts. 2017 URL: <http://www.dissercat.com/content/arkhitektura-obshchestvenno-torgovykh-tsentrov-v-istoricheskom-yadre-krupneishego-goroda-na-> (reference date: 30.08.2017).
7. Toissant J. Y. User, observer, programmer et fabriquer l'espace public. Losanne. 2013. 288 p.
8. Ageeva L. V. Sukonka – the vanished story // Kazanskiye Istorii. 2010. № 26. 8p.
9. Lebedev A. Rybnoryadskaya Square // The Republic of Tatarstan: a socio-political newspaper. 2015. № 209. 5 p.
10. Bayazitov A., Ibragimova R. The Moscow street // Kazanskiye Istorii. 2011. № 7. 4 p.
11. Ivanova E. A. Historical review of the formation of Kazan urban market areas // Architecton: izvestiya vuzov. 2012. № 40.

УДК 727

**Рачкова О.Г.** – старший преподаватель

E-mail: [olga.ra4kova@yandex.ru](mailto:olga.ra4kova@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Задачи проектирования современных «Центров подготовки космонавтов»**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы явился анализ и систематизация опыта проектирования Центров подготовки космонавтов и космических путешественников, с последующей разработкой концептуальных решений пространственной организации территории комплекса и созданием архитектурно-гармонизированной среды для комфортных условий подготовки космонавтов и персонала центра.

*Результаты.* На основе изученного опыта проектирования существующих Центров подготовки космонавтов, выявлен основной состав зданий и сооружений, необходимых для осуществления деятельности комплекса. Представлена укрупненная схема зонирования территории, с перечнем зданий входящих в определенные зоны. Определены требования к наиболее приоритетным зданиям, связанным с процессом подготовки на тренажерах и медицинскими обследованиями.

В рамках проведенной работы представлено концептуальное решение генерального плана территории Центра подготовки космонавтов и объемно-пространственная композиция комплекса в целом, с решением образа зданий современными средствами архитектуры.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в разработке концептуальных основ проектирования Центров подготовки космонавтов и рекомендаций в решении архитектурно-художественного образа зданий, для создания гармонизированного пространственной среды комплекса.

**Ключевые слова:** центр подготовки космонавтов, пространственная организация комплекса, концепция, архитектура зданий, опыт проектирования, гармонизация среды.

Покорение космоса, начавшееся в пятидесятые годы прошлого столетия, в настоящее время переросло в одну из активно развивающихся научно-исследовательских технологий современности – покорение космоса, решающую большое количество практических и научных задач [1].

В мире насчитывается более двух десятков космодромов, выполняющий различные по объемам и значимости работы для различных отраслей науки, промышленности, технологий, медицины и др. (табл. 1).

Космодромы, которые находятся в Ираке, Италии, ЮАР законсервированы или имеют неудачные запуски.

Современное развитие космонавтики дает возможность людям других профессий, мечтающих о космических полетах осуществить свою мечту. Освоение космонавтики непрофессионалами получило определение – космический туризм. Космический туризм признан экстремальным видом спорта и отдыха.

Для решения задач полетов в космос, необходимо рассмотреть широкий круг вопросов, связанный с современным состоянием и перспективами развития космонавтики, возможностями сложной предполетной подготовки, созданием современного поколения космических челноков и малых орбитальных станций для путешествия в космос. Эти и другие вопросы рассматривались на первом международном симпозиуме First International Symposium on Space, состоявшемся в 1997 году.

На протяжении уже двадцати лет, открываются специализированные туристические агентства, разрабатываются космические транспортные средства, развиваются центры по предполетной подготовке. Быстрое развитие космического туризма, должно в скором времени, привести к переходу КТ из одного из дорогих видов спорта и развлечений состоятельных людей, к одному из доступных видов отдыха обычных людей, сопоставимом с отдыхом на природе.

Таблица 1

**Космодромы различных государств и типы запусков**

№ п/п	Государство	Город-космодром	Пилотируемый запуск ракет	Непилотируемый запуск ракет
1	Россия	Плисецк		
2	Россия	Капустин Яр		+
3	Россия	Восточный		+
4.	Казахстан	Байканур	+	
5.	США	Мыс Канаверал	+	
6.	США	Остров Валоис		+
7.	США	Кодиак		+
8	США	Вандерберг		+
9.	США	Гэндо		+
10.	Израиль	Палмахим		+
11.	Китай	Сигуань		+
12.	Китай	Тайюань		+
13.	Китай	Цзюцюань	+	
14.	КНДР	Мусудан		+
15.	Индия	Шрихарикота		+
16.	Япония	Каюсима		+
17.	Япония	Танигасима		+

Среди компаний операторов рынка космического туризма находятся частные американские компании – Space Adventures, Armadillo Aerospace, Blue Origin, XCOR Aerospace; британская – Virgin Galactik; европейские – EADS Astrium, Copenhagen Suborbitals, Project Enterprise; японская – Kawasaki; российские – Роскосмос, Орбитальные технологии, Атлас Аэроспейс, Атлантик лайн. Космический туризм для России может стать перспективной отраслью, способной поддержать развитие научно-исследовательскую космонавтику за счет притока частных инвестиций [2].

К проведению космических полетов предъявляются высокие требования по:

- обеспечению безопасности космических туристов и окружающей среды;
- использованию современных, повышенной комфортности, космических станций и модулей доставки туристов, в связи, с чем ожидается снижение требований к состоянию здоровья туристов;
- обеспечению профессионального кадрового сопровождения, за счет привлечения опытных штатных космонавтов;
- международной регламентации суборбитальных полетов и полетов на МКС, с установлением регулярных рейсов.

Большое значение имеет местоположение космодрома, обеспечивающее благоприятные условия для запуска космических летательных аппаратов – близкое расположение к экватору и наличие большого количества солнечных дней в течение года.

На территории России потенциальные возможности имеются у двух космодромов, расположенных в Капустинском Яре (Астраханская область) и Восточный (Амурская область), являющийся первым гражданским космодромом [3].

Рассматриваемые космодромы подходят по параметрам близкого расположения от экватора и возможностью выбора в дальнейшем территорий для строительства центров подготовки космонавтов.

Следующий этап и самый ответственный это предполетная подготовка и медицинское обследование, которое регламентировано проводится в течении длительного времени. Единственным центром подготовки космонавтов из России и зарубежных стран, является Центр подготовки им. Гагарина. В данном случае назревает необходимость проектирования и строительства новых современных центров подготовки, которые будут располагаться вблизи космодромов, на оптимально допустимом расстоянии и будут обеспечивать качественную подготовку космонавтов.

Территории, выбранные для проектирования и строительства Центров по подготовке космонавтов и космических туристов, будут способствовать дальнейшему

градостроительному развитию этих областей, с образованием в дальнейшем городов спутников. Главное в таких центрах – это их многофункциональность, за счет зданий и сооружений, входящих в их состав, и выполняющих различные функции, связанные с комфортным проживанием, тренировками, спортом, работой и отдыхом [4, 5].

На основе проведенного анализа существующих центров и с учетом развития, была разработана схема зонирования территории и таблица с составом зданий и сооружений входящих в зоны (рис. 1, табл. 2).

В Центре подготовки находятся здания, относящиеся к зданиям общественного и жилого назначения: административные, офисные, зрелищные, общественного питания, гостиницы, жилые здания, медицинские учреждения [6-10]. В особую группу выделяются здания, которые непосредственно участвуют в тренировочном процессе, начиная с медицинского обследования и специальной подготовки на стендах и тренажерах. Параметры зданий и их объемно-планировочные решения, должны непосредственно учитывать размеры тренажерных устройств и стендов, с учетом резервных площадей.

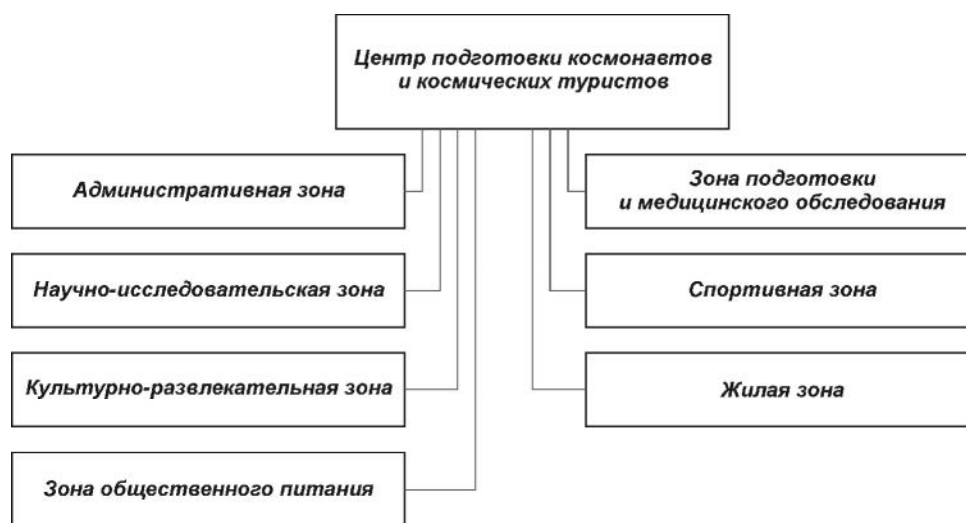


Рис. 1. Укрупненная схема зонирования территории Центра подготовки

Таблица 2

#### Здания и сооружения входящие в состав разных зон центра

№ п/п	Зона	Здания и сооружения	Назначение зданий
1.	Административная зона	Административное здание центра	Администрация центра, рабочие кабинеты, офисы, конференцзалы
2.	Научно-исследовательская зона	Научно-исследовательский центр	Проведение исследований в области развития космонавтики
3.	Зона подготовки и медицинского обследования	Специальные здания и сооружения для медицинского обследования и тренировки на тренажерах, стендах и макетах	Для проведения подготовки на экзогенных тренажерах и стендах и макетах кораблей для отработки навыков управления кораблем
4.	Спортивная зона	Спортивный комплекс	Спортивные залы для занятий спортом
5.	Культурно-развлекательная зона	Здание культурного центра	Зрительные и концертные зала
6.	Зона общественного питания	Комплекс кафе и ресторанов	
7.	Жилая зона	Гостиница, жилые дома и коттеджи	Проживание космонавтов и гостей центра, а также обслуживающего персонала



Особые требования предъявляются к зданиям, предназначенным непосредственно для процесса подготовки космонавтов и космических туристов.

Зона экзогенных тренажеров должна размещаться в зданиях имеющих универсальные зальные помещения, пролетом от 18 до 36 м и высотой от 6 до 12 метров, перекрытыми большепролетными конструкциями. В этих объемах размещаются крупногабаритные тренажеры в виде крупных узлов космических блоков ракет, установок и др. В них размещаются:

- помещение для установки центрифуги, для тренировки выдерживания перегрузок при взлете посадке;

- гидролаборатория – бассейн диаметром до 23 м и глубиной 12 м, с опускаемыми и поднимаемыми модулями космических ракет, для отработки на моделях выход и работу в открытом космосе;

- вестибулярные тренировки на кресле «Барони» и качелях «Хилова»,

- тренировки в барокамере, где отрабатываются нагрузки на повышение давления;

- тренировки в термокамере – на повышение температуры до 70°C и влажности 10 %;

- тренировки в сурдокамере – на устойчивость психики, при нахождении человека в абсолютной тишине.

Другая группа помещений с тренажерами и стендами предназначена для отработки навыков управления космическим кораблем на всех этапах полета, к ним относятся:

- современные комплексы тренажерорбитальных модулей Российского сегмента МКС;

- современные комплексы тренажеров пилотируемых кораблей Союз;

- компьютерные тренажеры динамических режимов;

- функционально-моделирующие учебно-тренировочные натурные макеты (мульти-медийные аудитории и стенды).

Вне центра отрабатываются: полеты в невесомости на Ил-76 МДК; на тренажере «океан», с экстренным покиданием спускаемой камеры в воду; тренировки на спускаемом аппарате «материк».

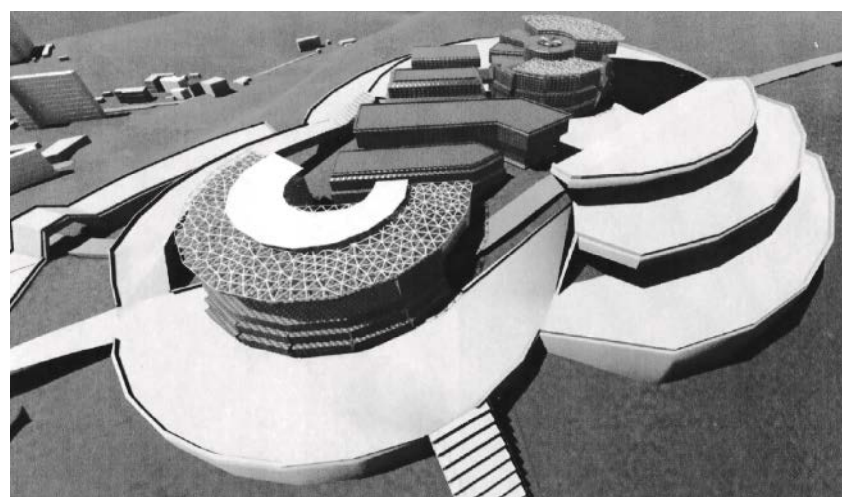
На основе проведенных исследований по проектированию «Центра подготовки космонавтов» было выполнено концептуальное проектное предложение пространственной организации территории комплекса (рис. 2) и представлены с зонированием территории по группам зданий и сооружений, и представлены объемно-пространственные композиции определенных групп зданий центра (рис. 3).



Рис. 2. Концептуальное проектное предложение пространственной организации территории «Центра подготовки космонавтов». Разработала Хуснуллина Р. (рук. Рачкова О.Г.)



а)



б)

Рис. 3. Объемно-пространственные композиции:

- а) объемно-пространственная композиция зданий административного назначения, научно-исследовательского сектора и культурного центра;
- б) объемно-пространственная композиция специальных зданий и сооружений для медицинских обследований и проведения тренировок и подготовки на тренажерах, стендах, натурных макетах

Проектирование современных центров по подготовке космонавтов и космотуристов должно учитывать как современное состояние развитие космического туризма, так и перспективы развития услуг, которые ближайшие годы планируют предоставить туристические агентства. На сегодняшний день Sace Alventures совместно с Роскосмосом организует космические путешествия на МКС с недельным пребыванием на станции. Следующий вид путешествий, который можно будет совершить в последующие 3-5 лет, полет на МКС с пребыванием на станции и выходом в космос на 2-3 часа. Агентство Deerp Expeditions (DSE) Alphi анонсирует, в ближайшие 5 лет, турне с пребыванием на МКС в течение 14 дней и облетом луны, которое продлится 5 дней. Тренировочный процесс и подготовка космических туристов в данном случае будет более сложным.

Наравне с космическими туристами, тренировочный процесс будут проходить и профессиональные космонавты, которые будут обеспечивать качество предполетной тренировки и дальнейшую безопасность совместного космического путешествия. В центре подготовки должны быть созданы соответствующие условия для космонавтов, специалистов, обслуживающего персонала и их семей.

**Список библиографических ссылок**

1. Стратегическое развитие Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС» на период до 2025 и перспективу до 2030 года. Роскосмос, 2017. 16 с. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/docs/2017/dokladstrategia.pdf> (дата обращения: 23.10.2017).
2. Большая гонка миллиардеров (Перевод И. Пахмутова). cosmos.agency : ежедн. интернет-изд. 2016. URL: [http://cosmos.agency/kosmicheskaya\\_gonka\\_milliarderov/](http://cosmos.agency/kosmicheskaya_gonka_milliarderov/) (дата обращения: 10.09.2017).
3. Комплекс предполетной подготовки космонавтов на Востоке построят к 2022 году // vz.ru : ежедн. интернет-изд. 2016. URL: <https://vz.ru/news/2016/6/1/813777.html> (дата обращения: 11.09.2017).
4. Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина. URL: <http://www.gctc.ru/> (дата обращения: 04.09.2017).
5. Зайченко Е. Н. Неизвестная сторона общественных зданий. Архитектура в экстремальных условиях // ardexpert.ru : ежедн. интернет-изд. 2015. URL: <https://ardexpert.ru/article/5035> (дата обращения: 12.10.2017).
6. Иконников А. В. Функция, форма, образ в архитектуре. М. : Стройиздат, 1986. 287 с.
7. Забельшанский Г. Б., Минервич Г. Б., Рапопорт А. Г., Сомон Г. Ю. Архитектура и эмоциональный мир человека. М. : Стройиздат, 1985. 207 с.
8. Луиджи Фьюмара. В Центре архитектуры должны быть не киловатты, а человек с его самоощущением в окружающей среде // green-city.su : ежедн. интернет-изд. 2016. URL: <https://green-city.su/architector-luidzhi-fyumara/> (дата обращения: 05.10.2017).
9. Luis de Garrido. Sustainable architecture. Green in Green. Barcelona, 2011. 95 с.
10. Мубаракшина Ф. Д. Использование принципов «устойчивой архитектуры» при разработке конкурсного проекта жилого дома в рамках профессиональной подготовки архитекторов: сб. ст. Международной конференции «Экономические и технические аспекты безопасности строительных критических инфраструктур» / Екатеринбург, 2015. С. 126–129.

**Rachkova O.G.** – senior lecturer

E-mail: [olga.ra4kova@yandex.ru](mailto:olga.ra4kova@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**The tasks of designing of modern «Cosmonaut training centers»****Abstract**

*Problem statement.* The aim of the work is to analyze and systematize the experience of designing the Cosmonaut and space travelers' training centers, with the conceptual solutions development for the spatial organization of the territory and the creation of an architecturally harmonized environment for comfortable training conditions for cosmonauts and center staff.

*Results.* Based on the experience gained in designing the Cosmonaut training centers, the main composition of buildings and structures necessary for the implementation of the complex's activities was identified. An enlarged zoning scheme for the territory containing a list of buildings within certain zones is presented. The requirements for the most priority buildings related to simulator training process and medical research have been determined.

Within the framework of the work carried out the conceptual decision of the general plan of the territory of the Cosmonaut training center and the volume-spatial composition of the complex as a whole was submitted with the resolution of the buildings image of modern means of architecture.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the architecture consists in the development of conceptual bases for the design of the Cosmonaut training centers and recommendations in the solution of the architectural and artistic image of buildings, for creating a harmonized spatial environment of the complex.

**Keywords:** cosmonaut training center, spatial organization of the complex, concept, architecture of buildings, design experience, harmonization of the environment.

### References

1. Strategic development of the state corporation for space activities «ROSKOSMOS» for the period up to 2025 and the prospect until 2030. Roskosmos, 2017. 16 с. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/docs/2017/dokladstrategia.pdf> (reference date: 25.10.2017).
2. Big race of billionaires (Translation by I. Pakhmutov). cosmos.agency : daily, internet-ed. 2016. URL: [http://cosmos.agency/kosmicheskaya\\_gonka\\_milliarderov/](http://cosmos.agency/kosmicheskaya_gonka_milliarderov/) (reference date: 10.09.2017).
3. The complex of preflight training of astronauts in the Vostochny will be built by 2022 // vz.ru : daily, internet-ed. 2016. URL: <https://vz.ru/news/2016/6/1/813777.htm/> (reference date: 11.09.2017).
4. Scientific and research testing center for cosmonaut training named after Y.A. Gagarin. URL: <http://www.gctc.ru/> (reference date: 04.09.2017).
5. Zaychenko E. N. Unknown side of public buildings. Architecture in extreme conditions // ardexpert.ru : daily, internet-ed. 2015. URL: <https://ardexpert.ru/article/5535/2015/12/3> (reference date: 12.10.2017).
6. Ikonnikov A. V. Function, form, image in architecture. M. : Stroiizdat, 1986. 287 p.
7. Zabelshansky G. B., Minervich G. B., Rapoport A. G., Somon G. Yu. Architecture and the emotional world of man. M. : Stroiizdat, 1985. 207 p.
8. Luigi Fiumara. In the Center of architecture there should not be kilowatts, but a person with his self-awareness in the environment // green-city.su : daily, internet-ed. 2016. URL: <https://green-city.su/architector-luidzhi-fyumara/> (reference date 05.10.2017).
9. Luis de Garrido. Sustainable architecture. Green in green. Barcelona, 2011, 95 p.
10. Mubarakshina F. D. The use of the principles of «sustainable architecture» in the development of a competitive project of an apartment building within the framework of the professional training of architects: dig of art. International conference «Economic and technical aspects of safety of building critical infrastructures» / Ekaterinburg, 2015. P. 126–129.

УДК 72.01

**Самойленко А.А.** – архитектор

E-mail: [anastasiia\\_samoilenko@mail.ru](mailto:anastasiia_samoilenko@mail.ru)

**Проектное бюро IVAR**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Чернышевского, д. 16, офис 2

**Денисенко Е.В.** – кандидат архитектуры, старший преподаватель

E-mail: [e.v.denisenko@bk.ru](mailto:e.v.denisenko@bk.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## Аналогии живых структур в архитектурном пространстве

### Аннотация

*Постановка задачи.* Целью исследования стало выявление взаимосвязи применения принципов аналогий живых структур в архитектурном пространстве, а также описать новый подход организации городской среды, позволяющий гармонизировать жизнь человека в городе.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в получении классификаций архитектурных объектов, основывающихся на аналогиях живых структур (функционально-пространственные – преобразование внутренних элементов, конструктивные – изменение общих габаритов проекта, интерактивные – внешняя и внутренняя трансформация архитектурной оболочки, декоративно-цветовые – изменение визуальных и смысловых характеристик объекта).

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в том, что использование аналогий живых структур в архитектурном пространстве позволит создать живую взаимодействующую с человеком, саморастущую, развивающую и функционирующую архитектуру, которая наполнит новым смыслом привычное понимание формирования архитектурной среды. Архитектура, обладающая некоторыми признаками жизни природных организмов – это один из наиболее оптимальных способов продлить сооружению «жизнь».

**Ключевые слова:** живые структуры, аналогии живых структур, природные системы, архитектурная бионика, взаимодействие архитектуры и природы, архитектурно-строительные и природные принципы.

Тенденция начала XXI века свидетельствует о стремлении архитектуры отражать представления об окружающем мире – быть аналогом живых организмов. Актуальность использования живых структур в архитектурном проектировании связана с тем, что современное общество столкнулось с рядом острых экономических, социальных, экологических проблем в ведении своей хозяйственной и экономической деятельности. Как следствие, взаимодействие архитектуры и природы на данный момент развития находятся в дисбалансе. В настоящее время технический прогресс обуславливает усиление темпов развития экономики, а соответственно и рост промышленных предприятий. В организации городского пространства необходим новый подход, который позволит усовершенствовать уже существующую структуру и позволит создать комфортную среду для жизни.

Анализ принципов органического «вживания» в городскую среду аналогий живых структур способствует переосмыслению формирования и функционирования архитектуры и архитектурного пространства. Рассматривается ряд футуристических концепций и анализируются динамически изменяемые проекты и сооружения, а также приемы и средства трансформации в архитектурном пространстве. Для получения результатов использованы классификации природных систем, графоаналитический метод анализа архитектурных проектов, метод обобщения объектов и нахождения зависимости и общих свойств, а также сравнительный анализ характеристик.

Формирование архитектурного пространства включает в себя цифровые технологии проектирования, современные конструкции и применяется в рамках биологически вдохновленных процессов. Природа – огромная лаборатория, которая

когда-либо была, существует и когда-либо будет. Неслучайно, архитектор Шулан Колатан<sup>1</sup> в своем интервью сказала: «Искусственные технологии сливаются с биологическими технологиями. В будущем строительные материалы будут значительно естественнее. Потому то, что в ближайшее время оболочки зданий будут напоминать кожу биологических организмов, – вовсе не фантазия».


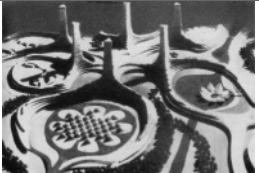

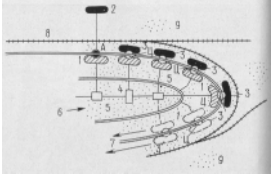





Интерес современных архитекторов концентрируется на исследовании проблемы адаптации городского пространства к постоянным изменениям окружающей действительности. Актуальная задача заключается в повышении адаптационных характеристик архитектурных объектов и систем, возможности трансформации и адаптации к быстро меняющимся внешним и внутренним условиям, что соответствует аналогии живых организмов. Способность к эволюции, соответствию актуальным особенностям среды, в которой находится природный объект, повышает его жизнеспособность; данный аспект способен реализоваться в архитектурном пространстве.

Итак, установлено, что в городском «организме», каждая часть связана с другой посредством необходимой взаимосвязи и все части вносят свой вклад в единую цель. В своей консолидированной части город представляется результатом органического процесса. Как и любой организм, для жизни город нуждается в непрерывных преобразованиях в зданиях и городских пространствах. Эти трансформации отличаются друг от друга и в результате архитектурной множественности представляют красоту и очарование городского ансамбля [1]. Современный город и его элементы способны эволюционировать совместно с биосферой за счет технологических нововведений и тесного взаимодействия архитектуры и природы [2].

Классификация видов проектирования по типу «внешняя городская аналогия», «внутренняя городская аналогия» и «технологичная городская аналогия» [3] демонстрирует взаимодействие «городского организма» и природы, доказывающие возможность их органичного сосуществования (табл. 1).

Таблица 1

## Сравнение города и живого организма

Виды	Архитектурный аналог		
Внешняя городская аналогия	 «Шагающие города»/ Archigram	 Жилой район «Рубероид»/ Ян Любич-Нич	 Hydrogenase: Город сад/ Венсан Кальбо
Внутренняя городская аналогия	 Динамический город/ Ю.С. Лебедева	 Независимое эко поселение/ Паоло Солери	 Multiplicity/ John Wardle Architects
Технологичная городская аналогия	 Летающий город / Бакминстер Фуллер	 Masdar city/ Foster + Partners	 Плавучий Экополис/ Венсан Кальбо

<sup>1</sup>Шулан Колатан – американский архитектор, родом из Стамбула; представитель дигитальной архитектуры.

### Внешняя городская аналогия

Проект «Шагающие города» открывает возможность существования мобильного города, перемещающегося в места с достаточными ресурсами и приспособлению его к потребностям (<https://paulkuz.livejournal.com/38932.html>). «Шагающий город» интерпретирует живой организм, ищущий место для жизни, которое будет отвечать жизненным критериям. Так, жилой район «Рубероид» – это экологическая структура, рассматривающая изменения системы в зависимости от действия климатических факторов (<http://tehne.com/event/arhivsyachina/lebedev-yu-s-bionika-i-gorod-budushchego-1973>). Район представляет собой подобие растительного мира. А город сад Венсана Кальбо, напоминая по форме стебелек травы, демонстрирует возможность перемещения плавучей архитектуры и способствует улучшению экологии (<http://www.mn.ru/society/87033>) [4].

### Внутренняя городская аналогия

В утопичном проекте Динамический город соединил органические принципы (<http://tehne.com/event/arhivsyachina/lebedev-yu-s-bionika-i-gorod-budushchego-1973>). Город стал синтезом законов построения и формообразования живой природы. Независимое эко-поселение Паоло Солери представляет собой синтез архитектуры и экологии: энергоэффективные гиперструктуры, вмещающие в себя население целого города ([http://archvuz.ru/2014\\_3/6](http://archvuz.ru/2014_3/6)). А концепт города Multiplicity использует аналогию живых организмов, когда растет вверх и вниз, в зависимости от нужд жителей, открывая новые воздушные или подземные пути (<https://hi-news.ru/technology/14-interesnyx-proektov-gorodov-budushhego.html>).

### Технологичная городская аналогия

Летающий город представляет собой девятые небеса – геодезические сферы, левитирующие за счет нагретого воздуха ([http://cyclowiki.org/wiki/Летающий\\_город](http://cyclowiki.org/wiki/Летающий_город)). Проект демонстрирует возможность нового типа жизни. В проекте Masdar city, который претендует на звание самого экологичного в мире метрополиса, используются все самые новые технологии для создания города с нулевым выбросом углерода (<https://hi-news.ru/technology/14-interesnyx-proektov-gorodov-budushhego.html>). А Плавучий Экополис иллюстрирует новый вид жизни, способный при критической ситуации стать прототипом «ноева ковчега» («климатические беженцы») (<http://www.mn.ru/society/87033>).

Анализ архитектурных концепций, отображенный в табл. 1, демонстрирует, что город – это живой организм, способный развиваться, расти, взаимодействовать с природой и использовать формообразование живой природы. Следовательно, города могут развиваться и представлять собой функционирующую природную систему. Примирение города и экосистемы – одна из главных задач в решении взаимодействия архитектуры и природы. Качество архитектуры и архитектурной среды возможно улучшить и реализовать за счет «вживания» в городскую ткань аналогий живых структур.

Адольф Лоос<sup>2</sup> сказал: «Архитектуру можно назвать идеальной, если она выглядит так, как будто это сделано Богом, но иногда образ разрушается и внезапно появляется другое здание, то, что сделал архитектор. И данное здание не может быть ни хорошим, ни плохим, это становится не важно, потому что баланс был разрушен»<sup>3</sup> [5]. Данный аспект демонстрирует значимость создания диалога между человеком, природой и архитектурой. Архитектура должна слушать природу, и понимать ее рассказы, отвечать правильным расположением, масштабом и внешним видом. Следовательно, необходимо понять концепцию и эволюцию современного пространства, которое мы хотим изменить в этом контексте, до тех пор, пока не произойдет слияние нашей территории, в которой

<sup>2</sup>Адольф Лоос – австрийский и чехословацкий архитектор и теоретик архитектуры. Его фраза: «Функция определяет форму».

<sup>3</sup>Авторский перевод. Оригинал: «the vernacular architecture appears inside the nature and looks like it is made by the same God, but sometimes this picture is being destroyed, when suddenly appears another building, another intervention made by an architect. He or she could be good or bad, it doesn't matter, because the natural image had already been destroyed».

мы живем, с природой и технологиями. Когда мы начинаем искать аналогию и связь между архитектурными элементами и природой, мы начинаем думать в трех основных направлениях, состоящих из стен, земли и крыши.

В сравнении организмов и зданий как архитектурных единиц, архитектура интерпретируется как построенная среда, которая находится под влиянием природы и системной жизни. Организмы – это открытые системы, обладающие способностью самостоятельного синтезирования.

В широком понимании, вся жизнь представляет собой продукт самоорганизации. В архитектурной интерпретации, самоорганизация предполагает принятие местного независимого решения изготовления, планирования и строительства без контроля извне. В процессе строительства, самоорганизация представлена еще не используемым стратегическим способом, но может обеспечить более экономичные способы строительства [6].

Петра Грубер<sup>4</sup> сформулировала аналогии организмов и зданий как архитектурных единиц, классифицировав их по показателям: рост и развитие, размножение, энергия, порядок, реакция на окружающую среду, использование информации, саморегуляция и метаболизм, эволюция [7] (табл. 2).

Таблица 2

Архитектурные интерпретации жизненных критериев (Петра Грубер) [3]

Признаки жизни	В природе	В архитектуре
Рост, развитие	Необратимый процесс увеличения размеров, связанный с новообразованием клеток, тканей и органов.	Пока не применяется в технологических решениях архитектуры, но есть предпосылки на создание саморастущих сооружений.
Размножение	Совокупность процессов, приводящих к увеличению числа особей некоторого вида.	Мы пока не можем строить дома, которые размножаются сами по себе. Хотя есть идея о создании типологии здания по примеру эволюции.
Энергия	Реакция на получение природных возобновляемых источников, фотосинтез.	Переработка и создание энергии осуществляется на всех уровнях и этапах искусственной среды.
Порядок	Совокупность процессов, приводящих к увеличению числа особей некоторого вида.	Архитектура обладает порядком на всех уровнях, но генерация порядка в архитектуре и биологии сильно отличается.
Реакция на окружающую среду	Активный процесс, связанный со многими факторами природы.	Аспект открывает возможности того, что будущие дома смогли бы производить.
Использование информации	Самостоятельный процесс получения, обработки, хранения и использования информации.	Информация для проектирования и строительства должна быть обработана.
Саморегуляция и метаболизм	Процесс производства питательных веществ и их окисления для получения энергии.	В архитектуре становятся все более нужной и важной темой. Окружающая среда создана и признана.
Эволюция	Самостоятельный процесс развития и адаптации к изменяющимся условиям.	В понятии постепенного развития актуальна во всех категориях архитектуры, но применение стратегий искусственной эволюции становятся все более доступным способом в дизайне.

<sup>4</sup>Петра Грубер – австралийский архитектор, доктор наук, профессор и автор книг о биомиметике в архитектуре.












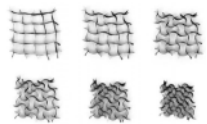
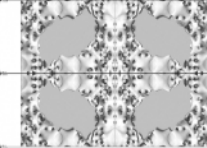

На основе данной классификации, можно сделать вывод, что на данный момент архитектуре не свойственны признаки живых организмов, хотя данная тема активно исследуется и изучается. Проблема адаптации архитектуры к постоянным изменениям окружающей действительности только возрастает. Архитектура, обладающая некоторыми признаками жизни природных организмов – это один из наиболее оптимальных способов продлить сооружению «жизнь» [8].

Архитектурная среда и сооружения должны быть способны к определенным трансформациям, исходя из потребностей пользователей и окружающей обстановке. Для поиска новых архитектурно-градостроительных решений используются аналогии природных живых структур. Живые структуры имеют большой потенциал при поиске новых оптимальных и «умных» решений и создании структурных элементов в архитектуре. Сегодня архитектура уже не просто вдохновляется природными формами, а природа диктует архитекторам свои методы и технологии работы с контекстом и формой [9-10]. Аналогия живых структур – вид архитектурных объектов, способных, в зависимости от природной и архитектурно-градостроительной ситуации, изменять объем, композицию, внутреннюю и/или внешнюю структуру строения, планировочные решения, внешний вид и светоцветовые качества. Отличительной особенностью представляется возможность ежедневного и/или периодического изменения, преобразования планировки и пространства сооружений, в соответствии с требованиями природных и человеческих процессов.

Аналогии живых структур можно классифицировать, исходя из способности к трансформации [8] (табл. 3).

Таблица 3

### Классификация аналогии живых структур

Аналогии живых структур				
Виды	Функционально-пространственные аналогии живых структур	Конструктивные аналогии живых структур	Интерактивные аналогии живых структур	Декоративно-светоцветовые аналогии живых структур
Аналоги	 Проект ХАБИТАТ 2020/ Philips	 «Жилые коконы»/ Archigram	 Проект Urban Block/ Dietma Koring	 Kiefer Technic Showroom/ Ernst Giselbrecht
	 Вращающийся небоскреб/ Дэвид Фишер	 Just a Minute/ Barberio Colella ARC	 Башни Аль-Бахар/ Бюро Aedas, 2012	 EXPO 2012 Just a Minute/ Barberio Colella ARC
	 Утопический город, 1958/ Ион Фридман	 «Химическая архитектура»/ MIT	 INVERSAbrane/ KOL, MAC, LLC	 EXPO 2017/ Павильон Великобритании

**Функционально-пространственные аналогии живых структур** – преобразование внутренних элементов. В случае функционально-пространственных живых структур происходят процессы внутренней адаптации архитектуры в пределах его оболочки. Так, например, проект «Хабитат 2020» демонстрирует возможность трансформации

«естественной кожи» здания – тысячи ячеек стены, словно живые клетки, должны решать сразу несколько задач, для улучшения качества жилой среды (<http://www.infuture.ru/article/830>). Проект вращающегося небоскреба в Дубаи, где каждый из этажей может совершать поворот на 360 градусов, предлагает жителям преобразовывать и перемещать здание по желанию (<https://archi.ru/projects/world/4633/vraschayuschii-sya-neboskreb-dynamic-tower>). Здание представляет собой новую ступень развития не только архитектуры, но и еще новую философию жизни, меняющую взгляд на облик городов. А утопический город, архитектора Иона Фридмана отражает платформы, расположенные в воздухе, над городом, которые можно при необходимости перемещать и тем самым менять пространство (<http://www.novate.ru/blogs/110415/30797/>). Данные пространственные приемы изменений позволяют приспособлять архитектуру к изменяющимся условиям.

**Конструктивные аналогии живых структур** – изменение общих габаритов проекта. Конструктивные живые структуры позволяют менять процессы внешней адаптации архитектурных объектов. В утопичном проекте «Жилые коконы» описывается возможность изменения формы и активного перемещения архитектуры в места с достаточным количеством ресурсов (<https://paulkuz.livejournal.com/38932.html>). Проект аварийного жилья «Just a Minute» отражает идею возможности трансформироваться по принципу «гармошки» (<http://archspeech.com/article/armiya-spaseniya-arhitektory-protiv-voyny-i-stihiynyh-bedstviy>). А ученые МИТ разработали новый материал, который растягивается и сжимается при разной температуре, повторяя принцип эластичности человеческой кожи (<http://archspeech.com/article/novyy-material-ot-mit-rastyagivaetsya-i-szhimaetsya-pri-raznoy-temperature>). Прототипом в данной разработке выступает «химическая архитектура» с интерактивной умной системой.

**Интерактивные аналогии живых структур** – внешняя и внутренняя трансформация архитектурной оболочки. Так, интерактивные живые структуры сообщают о возможности превращать здание в активную инсталляцию, где всевозможные управляющие устройства бесперемежно общаются и создают нужную архитектурную среду. В проекте «Urban Block» активно используется данный прием (<http://www.novate.ru/blogs/251012/21770/>). Здание частично поднимается над землей, освобождая пространство, когда это требуется. Башни Аль Бахар в Абу-Даби имеют на фасадах подвижные решетки, работа которых основывается на солнечной энергии, а движение управляется программой. Створы подвижных панелей делают климат внутри башни комфортным, а снаружи здание постоянно видоизменяется. ([http://www.architime.ru/specarch/aedas\\_architects/al\\_bakhar.htm#1.jpg](http://www.architime.ru/specarch/aedas_architects/al_bakhar.htm#1.jpg)). Проект «INVERSAbrane» демонстрирует, насколько функциональным может стать любое здание и полностью меняет представление о стандартном «зеленом» фасаде, основываясь на сложной геометрии, инновационных материалах и прогрессивных технологиях (<https://studfiles.net/preview/2990543/page:2/>). Фасадная мембрана создает уникальную возможность взаимодействия экологии здания с городом.

**Декоративно-цветовые аналогии живых структур** – изменение визуальных и смысловых характеристик объекта. Декоративно-цветовые живые структуры позволяют визуально изменять объёмно-пространственные характеристики архитектурной среды. В здании «Kiefer Technic Showroom» этот принцип отражает не только эстетическую функцию – изменение внешнего вида здания, но и функциональную – регулирование климата и освещенность помещений внутри здания (<http://www.architime.ru/specarch/giselbrecht/kiefer-technic-showroom.htm#1.jpg>). Павильон нефтяной компании GS Caltex на EXPO 2012 изменяет внешний вид и начинает светиться от одного прикосновения, его структура состоит из интерактивных элементов (<http://www.novate.ru/blogs/110415/30797/>). Данный прием показывает взаимодействие архитектуры на действие человека и жилой среды. А павильон Великобритании: Вселенная в архитектуре на EXPO 2017 показывает не только внешнее изменение от прикосновения, но и звуковое (<http://archspeech.com/expo-astana/pavil-on-velikobritanii->

vselennaya-v-arhitekture). Интерактивная инсталляция показала понятную взаимосвязь между архитектурой человеком и природой.

Живые структуры призваны совершенствовать окружение и жизнь человека; создавать гибкую, комфортную, мобильную и устойчивую архитектурно-пространственную среду; отражать движение научно-технического прогресса, отвечать общественным и природным идеалам и решать глобальные проблемы.

Венсан Кальбо<sup>5</sup>, опираясь на законы природы, вывел три требования к современной архитектуре, которым она должна отвечать. Первое – биоморфизм (повторение природных форм), второе – бионика (технические решения моделируются, отталкиваясь от структуры и стратегии жизнедеятельности организмов), третье – биомимикрия (образцом становятся природные механизмы) [4]. В данном контексте, природные системы рассматриваются как один из современных способов ответа на глобальные экологические проблемы.

В настоящее время архитекторами разрабатываются разнообразные архитектурные концепции, в которых прослеживаются попытки использования характеристик экосистемы. Тенденция развития с глобальным расширением масштабов технологий, современных достижений науки и с помощью применения новых материалов и технологий скоро станет возможным строить здания, которые будут непосредственно взаимодействовать с человеком и отвечать на его действия.

Итак, применение в строительстве и при организации городского пространства принципов развития живых структур, позволит создать живую взаимодействующую с человеком, саморастущую, развивающую и функционирующую архитектуру, которая позволит наполнить новым смыслом привычное понимание формирования архитектурной среды. Природные системы направлены на улучшение качества архитектуры и ее гармоничного сосуществования с природой, а развитие естественных и технических наук, революция в применении строительных материалов способствует расширению и систематизации подходов к организации пространства через «обращение» к живой природе. Анализ архитектурных проектов и концепций, исследований в области «живой» архитектуры демонстрирует, что только комплексный подход способен сформировать подобное архитектурное пространство.

### Список библиографических ссылок

1. Giuseppe Strappa. City as organism. R. : U+D edition Rome, 2016. 482 p.
2. Лебедев Ю. С. Архитектура и бионика. М. : Знание, 1971. 119 с.
3. Лебедев Ю. С. Город и время. М. : Знание, 1973. 302 с.
4. «Архитектура будущего: биоморфизм, бионика, биомимикрия» // mn.ru : ежедн. интернет-изд. 2013. URL: <http://www.mn.ru/society/87033> (дата обращения: 08.10.2017).
5. Santiago C. P. Dialogue Between Nature and Architecture. В. : MArch, 2016-2017. 204 p.
6. Akshay Shetty, Biomimicry. The use of biomimicry principles to create urban closed loop systems. P. : Arch, 2015. 115 p.
7. Petra Gruber, Biomimetic in architecture. A. : SpringerWienNewYork, 2012. 276 p.
8. Современные тенденции в архитектурном проектировании // Cont-trend-arch-proect.blogspot.ru : ежедн. интернет-изд. 2014. URL: <http://cont-trend-arch-proect.blogspot.ru/> (дата обращения: 09.10.2017).
9. Айдарова Г. Н. Ресурсосберегающая архитектура как альтернатива современного развития // Ресурсо- и энергосбережение как мотивация творчества в архитектурно-строительном процессе. Труды годичного собрания РААСН. Казань, 2003. С. 204–205.
10. Денисенко Е. В. Аналогии природных систем, природные и архитектурно-строительные принципы в отечественных и зарубежных исследованиях // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34). С. 33–40.

---

<sup>5</sup>Венсан Кальбо – бельгийский архитектор, занимается «зелеными» проектами для «Экополиса» будущего, соединяя архитектуру с биологией, информационными и коммуникационными технологиями. «Мы скоро будем жить в летающих домах и плавучих городах».

**Samoylenko A.A.** – architect

E-mail: [anastasiia\\_samoilienko@mail.ru](mailto:anastasiia_samoilienko@mail.ru)

**Project bureau IVAR**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Chernyshevsky st., 16, office 2

**Denisenko E.V.** – candidate of architecture, senior lecturer

E-mail: [e.v.denisenko@bk.ru](mailto:e.v.denisenko@bk.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## The analogy of living structures in architectural space

### Abstract

*Problem statement.* The article deals with the interrelation of application of the principles of living structures' analogies in architectural space, and also describes a new approach to organization of the urban environment that allows harmonizing the life of a human in a city.

*Results.* The main results of the research consist in obtaining classifications of architectural objects based of living structures' analogies (functional-spatial – transformation of internal elements, constructive – change in overall dimensions of the project, interactive – external and internal transformation of the architectural shell, decorative and light-color – change in visual and semantic characteristics of an object).

*Conclusions.* The analysis has proved that using living structures' analogies in the architectural space will allow creating a living, interacting with a human, self-growing, developing and functioning architecture that will let us fill the habitual understanding of formation of the architectural environment with a new meaning. Architecture, which has some signs of the natural organisms' life – is one of the most optimal ways to extend «life» to a construction.

**Keywords:** living systems, analogies of living systems, natural systems, architectural bionics, the interaction between architecture and nature, architectural and construction and natural principles.

### References

1. Giuseppe Strappa. City as organism. R. : U+D edition Rome, 2016. 482 p.
2. Lebedev Yu. S. Architecture and bionics. M. : Znaniye, 1971. 119 p.
3. Lebedev Yu. S. City and time. M. : Znaniye, 1973. 302 p.
4. «Architecture of the Future: biomorphism, bionics, biomimicry» // mn.ru : daily internet-edit. 2013. URL: <http://www.mn.ru/society/87033> (reference date: 08.10.2017).
5. Santiago C. P. Dialogue Between Nature and Architecture. B. : MBArch, 2016-2017. 204 p.
6. Akshay Shetty. Biomimicry. The use of biomimicry principles to create urban closed loop systems. P. : Arch, 2015. 115 p.
7. Petra Gruber. Biomimetic in architecture. A. : SpringerWienNewYork, 2012. 276 p.
8. Methods and means of transformation in architecture // Cont-trend-arch-proect.blogspot.ru : daily internet-edit. 2014. URL: <http://cont-trend-arch-proect.blogspot.ru/> (reference date: 09.10.2017).
9. Aidarova G. N. Resource-saving architecture as an alternative to modern development // Resource and energy saving as motivation for creativity in the architectural and construction process. Works of the annual meeting of RAASN. Kazan, 2003. P. 204–205.
10. Denisenko E. V. Analogies of natural systems, natural and architectural and construction principles in domestic and foreign research // Izvestiya KGASU. 2015. № 4 (34). P. 33–40.

УДК 72.01

**Цокур А.В.** – архитектор

E-mail: [artyomtsokur@gmail.com](mailto:artyomtsokur@gmail.com)

**ООО «Проектная Артель Анжелики Мелентьевой»**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Калинина, д. 48, оф. 317

**Денисенко Е.В.** – старший преподаватель, кандидат архитектуры

E-mail: [e.v.denisenko@bk.ru](mailto:e.v.denisenko@bk.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## Принципы поэтапного внедрения велосипедной инфраструктуры в городскую среду

### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить принципы и методы при тотальной адаптации городской среды под велосипедную инфраструктуру. Определить понятия принципов, выявленных на основе анализа зарубежного опыта велосипедизации. Сформировать новую типологию архитектурного пространства доступной городской среды.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в представленных методах и выявленных принципах при проектировании и планировании велосипедной инфраструктуры на основе анализа зарубежного опыта велосипедизации. С учетом территориально-планировочного, функционального и технологического метода, применяя принципы непрерывности, безопасности, экологичности, мобильности и доступности при внедрении велосипедной инфраструктуры в городскую среду, возникает необходимость комплексного подхода.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в формировании новой типологии городского пространства. Поэтапное внедрение велосипедной инфраструктуры влечет за собой изменения в архитектурном пространстве, реорганизацию улично-дорожной сети, создание доступной среды для пешеходов, велосипедистов и маломобильных групп населения.

**Ключевые слова:** велосипедисты, велосипедная инфраструктура, велотранспорт, городская среда, улично-дорожная сеть, архитектурное пространство.

Развитие роста городов в настоящее время стремительно набирает темп, что приводит к созданию новой среды. Размышляя над тем как реорганизовать, улучшить доступную городскую среду, можно выделить концепцию завершенных улиц. Специалисты по градостроительству, экологически устойчивому транспорту, «велопешеходная» общественность США и Канады, сформулировали и продвигают концепцию «Завершённых улиц» (Complete Streets), подчёркивая тезис о том, что дизайн любой городской улицы не может считаться завершённым, пока не будут предусмотрены условия для обеспечения всех видов перемещений [1].

Прогулка в среде, спроектированной для скорости 60 км/ч – это отсутствие впечатлений и скука – Ян Гейл «Города для людей». Передвигаясь по городу на автомобиле, восприятие городского пейзажа ограничено, человек не успевает уловить детали, звуки, городское движение. Улицы, перегруженные автомобильным трафиком, превращаются в дороги, что некомфортно для пешеходов. По словам Яна Гейла, «Люди делают город безопасным» [2]. Перед человечеством стоял выбор: велотранспорт или автотранспорт, но города проектировались под автомобильный трафик. Выбрав путь автомобилизации, человек становится зависим от ряда условий: приоритетное развитие нефтяной отрасли, увеличение автомобильных дорог и сферы автомобильного производства.

В городах для людей важен человеческий масштаб. Так, на примере рассуждения общественного деятеля, исследователя проектного творчества и архитектурного наследия Глазычева В.Л., из цикла лекций о городских пропорциях, подтверждается влияние масштаба архитектурных объектов на сознание человека. Человеческий масштаб формируется на уровне визуального ориентира, важна детализация и проработка среды на уровне 1-ого этажа, что во многих городских пространствах отсутствует. От масштаба

вертикального – к горизонтальной плоскости, необходимо учесть измерение человеческого шага. При реорганизации пешеходных и автомобильных зон, важно организовать неиспользуемое уличное пространство каждого квадратного метра соответствующей функцией. Об этом упомянул Свен-Ингвар Андерссон, профессор ландшафтного проектирования в Архитектурной школе при Королевской академии искусств Дании, где он работал с 1963 по 1994 гг. [3].

Однако большинство зарубежных городов прошли процесс велосипедизации. На примерах внедрения велосипедного транспорта в городскую структуру и адаптации улично-дорожной сети под все типы городских передвижений, выявлены следующие методы проектирования велотранспортной инфраструктуры:

1. Территориально-планировочный метод. Выявление новых возможностей использования городской территории для обеспечения мобильности:

1.1 планировочная реорганизация и реконструкция существующих транспортных коридоров для увеличения их пропускной способности (сокращение или увеличение полос, реконструкция перекрестков, создание отдельных дорог, разноуровневых пересечений и т.д.);

1.2 перераспределение пассажиропотоков с использованием внеуличных территорий (озеленённые зоны, полосы отчуждения вдоль железнодорожных путей и т.д.).

2. Функциональный метод. Повышение эффективности поездок:

2.1 дифференцирование потоков по расстоянию, скорости, времени, типу используемого транспорта;

2.2 совмещение/разделение потоков;

2.3 развитие интермодальности;

2.4 реорганизация дорожного движения.

3. Технологический метод. Внедрение новых транспортных решений, транспортных средств и видов транспорта для обслуживания населения.

Как показал выполненный анализ зарубежной практики, планирование велосипедного движения и инфраструктуры осуществляется на нескольких базовых принципах, основанных на концепции системного подхода к безопасности дорожного движения [4].

На основе анализа опыта используемых средств, при проектировании велосипедной инфраструктуры, выявлены следующие принципы: принцип непрерывности, принцип безопасности, экологический принцип, принцип мобильности, принцип доступности.

### **Принцип непрерывности**

Данный принцип обусловлен безбарьерным передвижением. В нем учитываются минимальные уклоны и непрерывное преодоление ландшафтных препятствий за счет архитектурных средств.

Голландская архитектурная компания воплотила фантазию велосипедистов в реальность, обеспечив непрерывный доступ через Рейин-канал в г. Утрехт, в Амстердаме, за счет велосипедного моста, проходящего по крыше университета [5]. В данном проекте использован принцип непрерывности и территориально-планировочный метод, что создает беспрепятственное передвижение по оживленному городу, избегая автомобильный трафик, транспортные развязки и проблемные зоны (рис. 1).

Велосипедные связи в городской структуре не должны привязываться к существующей улично-дорожной сети. На примере самого длинного велосипедного моста на сегодняшний день в Китае [6], мост – велосипедная магистраль, шириной 5 метров, частично проходит под автомобильным хайвеем, который выполняет роль крыши, защищающей велосипедистов от солнца и осадков. Пропускная способность моста 2023 человека в час, вдоль маршрута имеются станции проката, где доступны триста велосипедов, а также велопарковки. Для освещения задействовано тридцать тысяч фонарей. Пешеходы, велосипедисты и автомобилисты не пересекаются, за счет разделения потоков на разных уровнях, тем самым, дорожная сеть и велосипедная не повторяют маршрут (рис. 2).



Рис. 1. Веломост, через Рейн-канал, г.Утрехт [5]



Рис. 2. Веломост, г.Сямынь [6]

Велосипедист должен доехать до пункта назначения беспрепятственно и без помех. Велопользователи высоко оценят преимущества взаимоувязанной единой велосипедной сети, что позволит перемещаться, не останавливаясь из-за бордюров, переходов, перекрестков и других препятствий. Каждый дом, каждый офис и учреждение должны быть доступны на велосипеде, т.е. иметь подъездные пути для выезда на опорную велотранспортную сеть [7]. Связанность подразумевает наличие связи с другими транспортными сетями, главным образом, остановками общественного транспорта и пересадочными узлами. Организация движения через водные объекты (рис. 3а), прохождение сквозь архитектурные объекты (рис. 3б), разделения на уровни для обеспечения минимального количества пересечений с другими участниками дорожного движения (рис. 3в).

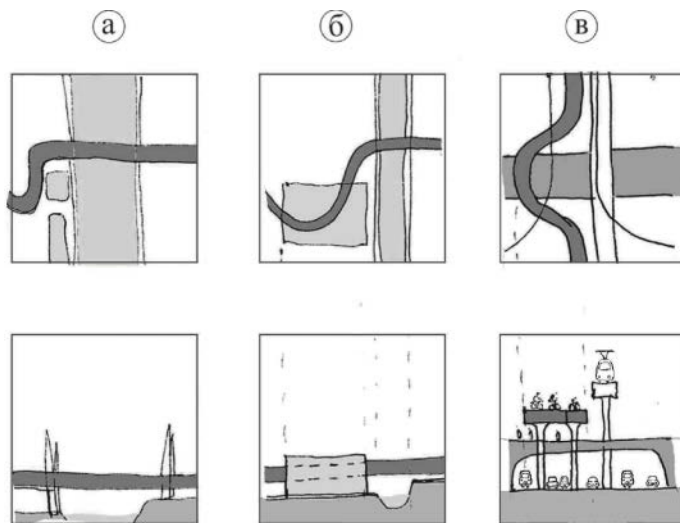


Рис. 3. Велосипедные связи (авторская разработка)

### Принцип безопасности

Обеспечение защищенности при передвижении на велотранспорте, заблаговременно предупреждая о препятствиях на пути. В основе принципа в зависимости от ситуации, учитывается физическое или визуальное разделение потоков.

Недостаточно обособленные велополосы в результате эксплуатации приводят к ДТП и протестным акциям. Пример акции за безопасную велосипедную инфраструктуру в Берлине: жители огородили велополосу от проезжей части детскими игрушками. Цель акции - показать городу, что им нужны обособленные велодорожки, так как по ним ездят и дети в сопровождении взрослых (рис. 4) [8]. Подобный пример появился в Провиденсе на Род-Айленде. Житель Джеффри Лири использовал инструмент для прочистки труб (Вантуз). Власти отреагировали положительно, представитель мэра Провиденса Эмили Кроуэлл пообещала, что в ближайшее время городская администрация решит вопрос с обособлением велодорожки с помощью менее экстравагантных средств (рис. 5) [9].



Рис. 4. Протестная акция, г. Берлин [8]



Рис. 5. Обособление велополос, г. Род-Айленд [9]

На примере Лос-Анджелеса, все существующие проблемы перевели в цифровые значения, с участием общественников и проектной группы при поддержке мэра стали вести аналитику по определенным районам города, и при решении небольших участков, наблюдали эффект в числовых показателях (рис. 6). Так, к примеру, по магистральной улице с интенсивным автомобильным движением, ввели новую полосу, выяснилось, что при увеличении проезжей части загруженность и проходимость улицы не уменьшилась. Новый подход при рассмотрении ДТП в Лос-Анджелесе на основе аналитики, пример изучения улицы, тепловая карта (рис. 7) [3].

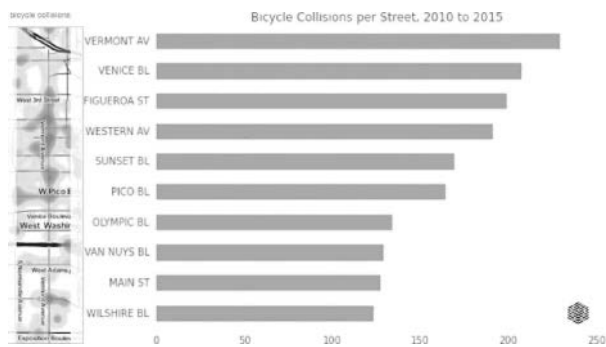


Рис. 6. Тепловая карта ДТП улицы



Рис. 7. Улично-дорожная сеть в Лос-Анджелесе [3]

Безопасность достигается при помощи интуитивного дизайна:

- Обособление, путём использования дополнительных элементов инженерного обустройства, участников дорожного движения (рис. 8а).
- Распределение участников дорожного движения на разных уровнях (рис. 8б).

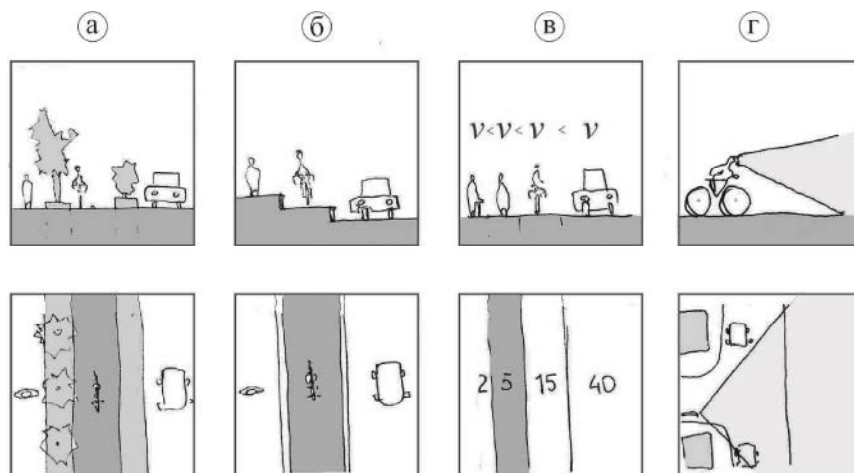


Рис. 8. Обеспечение безопасности (авторская разработка)



– Успокоение трафика, скорость автомобиля должна быть приближена к скорости велосипеда. Велосипедисты не создают какой-либо существенной опасности, но сами чувствуют себя уязвимыми при движении в общем потоке с автомобилями. Основной риск заключается в разнице скоростей и массы транспортных средств (рис. 9в).

– Обеспечение видимости, Велосипедист должен всегда находиться в поле зрения автомобилиста (рис. 10г).



Рис. 9. План Видения Synergier [10]

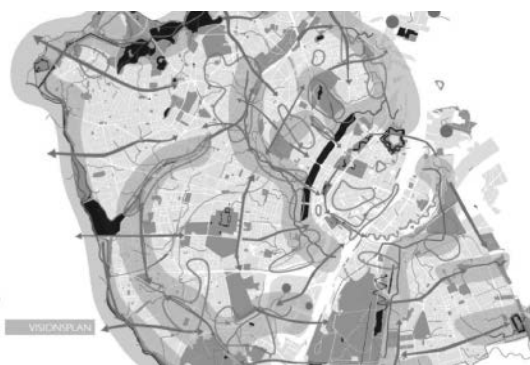


Рис. 10. Водно-зеленый каркас, г. Копенгаген [10]

### Экологический принцип

Экологический принцип подразумевает учет природных особенностей местности, выбор материала при строительстве и улучшение экологической обстановки за счет внедрения в городское пространство велосипедной инфраструктуры.

В результате исследования, на примере г. Альметьевска, с населением 250 тыс. человек, выявили, что при сокращении автомобильных поездок на 5 %, выбросов CO<sub>2</sub> сократилось на 14 тыс. тонн в год, что аналогично посадке 600 га леса. (лекция главы муниципального района г. Альметьевска Айрат, Велоconгресс 2016 г. г. Москва)

На примере Копенгагена: новая реализованная концепция муниципалитета «GREEN CLIMATE ADAPTION», цель которого – осуществление координации водно-зеленой инфраструктуры. Велосистема – как средство совершенствования функциональной структуры зеленого каркаса (рис. 10). На основе 16 климатических карт основан план Видения «Synergier» (рис. 9) [10]. Данный пример показывает необходимость комплексного подхода при планировании перспективы развития города.

В настоящее время идет активное внедрение велоинфраструктуры и разработка велосипедов, очищающих воздух, решая проблему экологической обстановки в Китае, города погрузились в смог. Горожане вынуждены при поездках на велосипеде использовать респираторы. Экологическая обстановка в Пекине ухудшилась, из-за большой загазованности. Власти активно поддерживают велодвижение, строятся новые трассы и стоянки, открываются пункты проката.

Улицы, загруженные автомобилями, ухудшают экологическую обстановку, создают ряд загрязнений: акустическое (рис. 11а), дорожное (рис. 11б), атмосферное (рис. 11в), решением становится альтернативный вид транспорта – велосипед (рис. 11г). Инвестиции в велосипедную инфраструктуру не панацея от всех бед цивилизованного мира, но они важная часть перехода стран к более осмысленной, зеленой экономике.

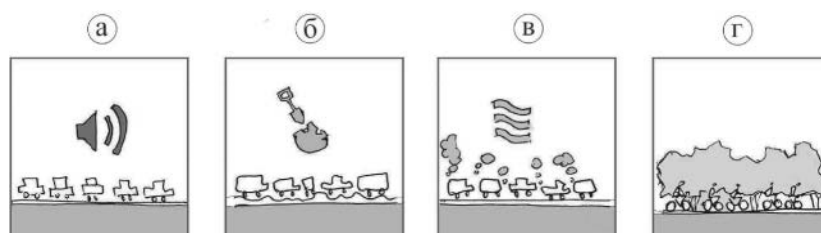


Рис. 11. Экологическая значимость (авторская разработка)

### Принцип мобильности

Городская мобильность обусловлена экономией времени. Временной фактор для человека, одна из главных единиц измерения, не имеющая определенную цену. Люди дорожат временем, рационально распределяя его в ежедневном цикле. Потеря времени впустую приводит к дальнейшим последствиям – ухудшению психического состояния, разрушению выстроенных планов на день.

По словам блогера, Аркадия Гершмана, транспортного проектировщика, в гонке за городскую мобильность побеждает велотранспорт. Он выделяет понятие «Новая мобильность». Данная концепция, сформулированная Жиль Веско (отвечает за развитие транспорта в г. Лион), заключается в том, что человек полагается не на личный автомобиль, а на общественный транспорт – каршеринг, велосипед, самокат, сигвей и прочие колёсные. Веско прогнозирует революцию, которая изменит не только сложившееся отношение к транспорту, но и города в целом. «Цель – вернуть общественные пространства и создать город для людей, будет меньше загрязнения, шума, стресса, город станет более пригоден для пеших прогулок» – со слов Веско<sup>1</sup>.

Велосипедные маршруты не должны полностью повторять улично-дорожную сеть (рис. 12). Маршрут выстраивается оптимальным путем, что сокращает время прохождения. Возможность подъезда к пункту назначения к входной группе. Велосипедные связи могут проходить на разных уровнях, разделяя участников дорожного движения в пространстве (рис. 13). Многие существующие маршруты проходят по лесным зонам (рис. 14).



Рис. 12. Без пересечений [11]    Рис. 13. Отдельное прохождение [11]    Рис. 14. Маршрут в лесу [11]

При передвижении на автомобиле от пункта А до пункта Б по существующей улично-дорожной сети, происходит потеря времени за счет наибольшего расстояния прохождения пути и остановок на перекрестках (рис. 15а), на примере пешехода, возникают трудности в скорости движения (рис. 15б), таким образом, учитывая кратчайшее расстояние, мобильным видом городского транспорта становится велосипед (рис. 15в).

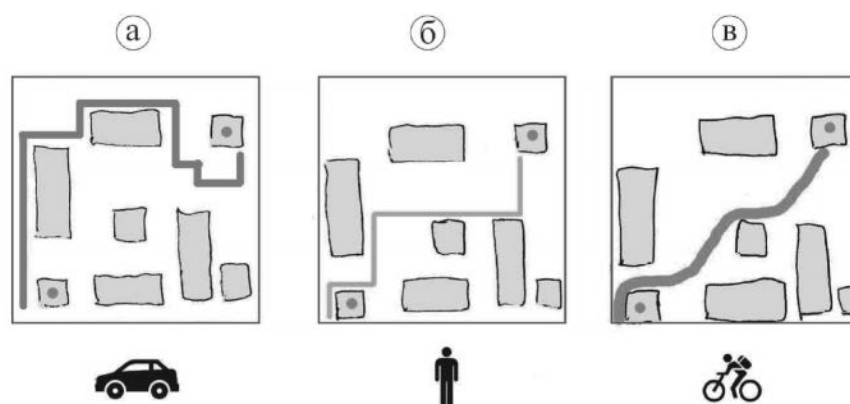


Рис. 15. Городская мобильность (разработка автора)

<sup>1</sup>Конец эры автомобилей: как города отказываются от машин // LETSBIKEIT.RU : ежедн. интернет-изд. 2010. URL: <http://letsbikeit.ru/2016/03/end-of-the-car-age/> (дата обращения: 24.05.2017).

**Принцип доступности**

Принцип Доступности дает возможность преодолевать вертикально и горизонтально ландшафтные и городские препятствия, используя кратчайшее расстояние из точки А в точку Б. За счет более комфортного и удобного доступа, велотранспорт в городской системе более мобильный.

**1. Вертикальная доступность:**

Владимир Де Поло, при встрече, поделился опытом использования лифтов для велосипедистов в Сербии в городе Белград (рис. 16).



Рис. 16. Лифт в Белграде, соединяющий велосипедный маршрут с мостом<sup>2</sup>

Оригинальный подъемник придумали в Норвегии в г. Тронхейм, длиной 130 метров. Используют его для подъема на холм велосипедисты, молодые мамы с коляской и местная детвора (рис. 17)<sup>3</sup>



Рис. 17. Лифт для велосипедистов в г. Тронхейме<sup>3</sup>

Жилой Дом для велопользователей (рис. 18). Архитекторы Hauschild + Siegel придумали альтернативные решения в планировке дома, которые должны заменить функции автомобилей:

- Большие почтовые, ящики для больших посылок при заказе онлайн;
- Широкие лифты с двумя входами для простого заезда с велосипедом;
- Парковки для велосипедов на этаже у квартир;
- Возможность завезти товары на велосипеде к холодильнику;
- Бесплатная аренда грузовых велосипедов и детских велоколясок [12].

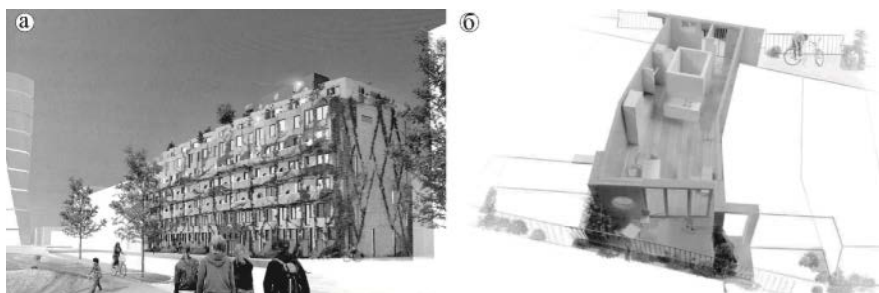


Рис. 18. Проект жилого дома для велопользователей [12]: а) экстерьер б) интерьер (жилая единица)

<sup>2</sup>Сербский экспромт // LIVEJOURNAL.COM : ежедн. интернет-изд. 2014. URL: <https://nikstepanov.livejournal.com/13625.html> (дата обращения: 02.09.2017).

<sup>3</sup>Первый подъемник для велосипедистов в Норвегии // FISHKI.NET : ежедн. интернет-изд. 2014. URL: <http://fishki.net/1342105-pervyj-podemnik-dlja-velosipedistov-v-norvegii.html> (дата обращения: 05.02.2017).

Агрегат под названием Vycle, который придумала и сконструировала выпускница Королевского колледжа искусств в Лондоне Ларриба Е. Перемещаясь вверх-вниз по вертикальным рельсам, передача приводит в движение подъёмник, использованного на примере интерьера нового архитектурного пространства (рис. 19)<sup>4</sup>.



Рис. 19. Велосипедный Агрегат VCYCLE, часть интерьера<sup>4</sup>

## 2. Горизонтальная доступность:

Интересный факт прозвучал на лекции Международного велоконгресса 2017 г. в г. Москва от мексиканского общественного деятеля Peatonito – в Мексике закапывают подземные переходы, по принципу «человек на уровне земли», активисты убедили властей в ненужности и неудобстве подземных переходов после чего их благополучно закопали. В настоящее время многие европейские города возвращают наземные пешеходные переходы, наземные и подземные переходы не решили проблему безопасности и доступности, а наоборот усугубили. Наземный переход для пешеходов, велосипедистов и маломобильных групп населения – самое простое и правильное решение доступной среды.

Велопешеходный наклоняемый Мост Тысячелетия, через реку Тайн соединяет города Гейтсхед и Ньюкасл-апон-Тайн в Великобритании, обеспечивает доступ с одного берега на другой (рис. 20). Круговой вантовый мост «Hovenring», обеспечивает разделение потоков автомобильного и велосипедного движения на перекрестке, Уникальность моста за счет своей конструкции, с одной опорой в центре (высота – 72 м) (рис. 21)<sup>5</sup>.



Рис. 20. Велопешеходный мост, г. Лондон<sup>5</sup>



Рис. 21. Мост Hovenring<sup>5</sup>

Тоннель, обеспечивающий доступ сквозь архитектурный объект в Амстердаме, разделили на две части: для велосипедистов и пешеходов (длина – 110 м) (рис. 22) [13]. Подобный пример находится в городке Хейненоорд, подводный тоннель для велосипедистов, что дает возможность проехать под рекой (рис. 23) [14].

<sup>4</sup>На крышу на велосипеде // VELONATION.RU : ежедн. интернет-изд. 2017. URL: <https://velonation.net/2017/07/25/vycyle/> (дата обращения: 21.09.2017).

<sup>5</sup>Кумов В. Прочные связи // LETSBIKEIT.RU : ежедн. интернет-изд. 2010. URL: <http://letsbikeit.ru/2016/08/bridges/> (дата обращения: 24.05.2017).



Рис. 22. Велопешеходный тоннель [13]

Рис. 23. Велопешеходный тоннель [14]

Доступность обеспечена за счет технологических средств на примере анализа зарубежного опыта. Возможность попасть на верхние этажи в здания, с помощью лифта (рис. 24а), подняться на холм без дополнительных усилий с помощью подъемника (рис. 24б), обеспечение доступа с набережной на мост за счет велосипедного лифта (рис. 24в). Возможность пересекать водные преграды с помощью веломоста (рис. 24г), а также под водой за счет тоннелей (рис. 24д) и проезжать сквозь природный ландшафт (рис. 24е).

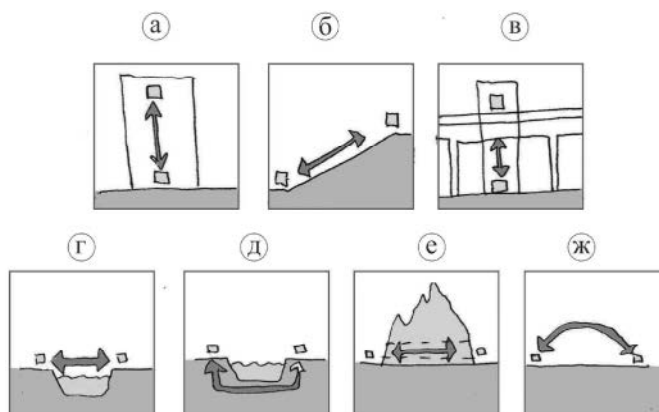


Рис. 24. Городская доступность (авторская разработка)

Для небольших по площади европейских городов характерен масштабный подход при велосипедизации. Внедрение велотранспорта в городскую транспортную систему сопровождалось тотальными изменениями улично-дорожной сети, и перестраивался практически весь город. Интегрировав результаты изученных городов, невозможно вывести формулу оптимального велогорода. Образ города создается во времени и пространстве под воздействием самых различных факторов [15]. Особенность проектирования велодорожек в европейских городах: мягкие климатические условия, позволяющие использовать велотранспорт наибольшую часть года без применения дополнительных устройств.

В заключение мировой аналитики необычный пример велосипедизации, который случился вне всякой закономерности и планирования, исходя из обстоятельств, в г. Староконстантинов с населением 30 тыс. человек на северо-востоке Украины в начале 90-х годов XX века. В период тяжелого кризиса, вследствие подорожания автомобильного топлива и билетов на общественный транспорт, первыми, кто пересел на велосипеды стали люди с малым достатком – пенсионеры и обычные (совсем не спортивные и молодые) жители города (со слов архитектора Мелентьевой А.В.).



Рис. 25. Поэтапная адаптация города (авторская разработка)

Поэтапное внедрение велосипедной инфраструктуры, влечет за собой изменения в архитектурном пространстве: реорганизация улично-дорожной сети, создание доступной среды для пешеходов, велосипедистов и маломобильных групп населения (рис. 25). Для безошибочного перспективного планирования и проектирования городской среды необходимо учитывать представленные в статье принципы (непрерывность, безопасность, экологичность, мобильность, доступность) и методы (территориально-планировочный, функциональный, технологический), выявленные на основе зарубежного опыта велосипедизации. Велосипедная инфраструктура – элемент устойчивого развития города.

### Список библиографических ссылок

1. Евгенийев Г. И. Отчёт о научно-исследовательской работе. Разработка методик и стандартов для объектов транспортной инфраструктуры: пешеходного и велосипедного движения (1 этап). М. : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 2016. 230 с.
2. Роджер Я. Г. Города для людей. М. : Концерн «КРОСТ», 2012. 276 с.
3. Джанет С. Битва за города. Как изменить наши улицы. Революционные идеи в градостроении. М. : Олимп-Бизнес, 2017. 416 с.
4. Евгенийев Г. И. Отчёт о научно-исследовательской работе. Разработка методик и стандартов для объектов транспортной инфраструктуры: пешеходного и велосипедного движения (заключительный). М. : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 2016. 223 с.
5. Велосипедный мост в Утрехте, проходящий по крыше здания // PIKABU.RU : ежедн. интернет-изд. 2009. URL: [https://pikabu.ru/story/velosipednyiy\\_most\\_v\\_utrechte\\_prokhodyashchiy\\_po\\_kryishe\\_zdaniya\\_4963070](https://pikabu.ru/story/velosipednyiy_most_v_utrechte_prokhodyashchiy_po_kryishe_zdaniya_4963070) (дата обращения: 10.05.2017).
6. Longest elevated cycle path in the world opens in China. // ROAD.CC : ежедн. интернет-изд. 2017. URL: <http://road.cc/content/news/217380-longest-elevated-cycle-path-world-opens-china> (дата обращения: 05.09.2017).
7. Дирк Д. Велотранспортная инфраструктура. Принципы и практика проектирования. М. : ИНФРА-М. 2016. 272 с.
8. Уроки велосипедного Берлина // VELOMAN.UZ: ежедн. интернет-изд. 2014. URL: <http://veloman.uz/blog/velotourism-cycling/68185/> (дата обращения: 27.03.2017).
9. Вантуз – орудие велоактивиста // VELONATION.NET : ежедн. интернет-изд. 2017. URL: <https://velonation.net/2017/06/02/plunger/> (дата обращения: 27.03.2017).
10. Green Climate Adaptation // TREDJENATUR.DK : 2015. URL: <http://tredjenatur.dk/en/portfolio/green-climate-adaption/> (дата обращения: 25.09.2017).
11. Meridian I Rode Hiroshima's Epic, 70-Kilometer Bike Route // MERIDIAN.NAT : ежедн. интернет-изд. URL: <https://www.meridian.net/2016/9/26/13059164/japan-tours-cycling-longform-essay> (дата обращения: 03.09.2017).
12. Дом для велосипедистов поможет отказаться от автомобилей // ARCH:SPEECH.RU : ежедн. интернет-изд. 2010. URL: <http://archspeech.com/article/dom-dlya-velosipedistov-pomozhet-polnost-yu-otkazat-ot-avtomobiley> (дата обращения: 22.09.2017).

13. Тоннель в Амстердаме выложенный плиткой с рисунками // ETODAY.RU : ежедн. интернет-изд. 2012. URL: <http://www.etoday.ru/2016/03/tonnel-v-amsterdamе-vylozhenny-plitkoj-s-risunkami.php> (дата обращения: 25.09.2017).
14. 10 самых впечатляющих инфраструктурных объектов для велосипедистов // NOVATE.RU : ежедн. интернет-изд. URL: <http://www.novate.ru/blogs/060414/25954/> (дата обращения: 25.09.2017).
15. Надырова Х. Г. Развитие градостроительной культуры Казанского ханства // Золотоордынское обозрение. 2014. № 2. С. 147–171.

**Tsokur A.V.** – architect

E-mail: [artyomtsokur@gmail.com](mailto:artyomtsokur@gmail.com)

**LTD «Project Artel of Angelica Melentieva»**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Kalinin st., 48, off. 317

**Denisenko E.V.** – senior lecturer, candidate of architecture

E-mail: [e.v.denisenko@bk.ru](mailto:e.v.denisenko@bk.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **The principles of the phased implementation of bicycle infrastructure in the urban environment**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the research is to reveal the principles and methods with the total adaptation of the urban environment to the bicycle infrastructure. To define concepts of the principles revealed on the basis of the analysis of foreign experience of bicycling. Form a new typology of the architectural space of an accessible urban environment.

*Results.* The main results of the research consist of the presented methods and identified principles in the design and planning of the cycling infrastructure based on the analysis of foreign cycling experience. Taking into account the spatial planning, functional and technological method, applying the principles of continuity, safety, environmental friendliness, mobility and accessibility when introducing bicycle infrastructure to the urban environment, there is a need for an integrated approach.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the architecture consists in the formation of a new typology of urban space. The gradual introduction of the bicycle infrastructure entails changes in the architectural space, the reorganization of the street and road network, the creation of an accessible environment for pedestrians, bike users and low-mobility groups of the population. Almost all the city is being rebuilt.

**Keywords:** cycle users, bicycle infrastructure, cycling, urban environment, street-road network, architectural space.

#### **References**

1. Evgeniev G. I. Report on research work. Development of methods and standards for transport infrastructure: pedestrian and cycling (Stage 1). M. : Moscow Automobile and Road State Technical University, 2016. 230 p.
2. Rojer J. G. Cities for people. M. : Concern «KROST», 2012. 276 p.
3. Janet S. Battle for the city. How to change our streets. Revolutionary ideas in urban planning. M. : Olimp-Biz, 2017. 416 p.
4. Evgeniev G. I. Report on research work. Development of methods and standards for transport infrastructure: pedestrian and bicycle traffic (final). M. : Moscow Automobile and Road State Technical University, 2016. 223 p.

5. Bicycle bridge in Utrecht, passing along the roof of the building // PIKABU.RU: daily. Internet-edit. 2009. URL: [https://pikabu.ru/story/velosipednyiy\\_most\\_v\\_utrekhte\\_prokhodyashchiy\\_po\\_kryishe\\_zdaniya\\_4963070](https://pikabu.ru/story/velosipednyiy_most_v_utrekhte_prokhodyashchiy_po_kryishe_zdaniya_4963070) (reference date: 10.05.2017).
6. Longest elevated cycle path in the world opens in China. // ROAD.CC: daily. Internet-edit. 2017. URL: <http://road.cc/content/news/217380-longest-elevated-cycle-path-world-opens-china> (reference date: 05.09.2017).
7. Dirk D. Bicycle transport infrastructure. Principles and practice of designing. M. : INFRA-M, 2016. 272 p.
8. Lessons of cycling Berlin // VELOMAN.UZ: daily Internet-edit. 2014. URL: <http://veloman.uz/blog/velotourism-cycling/68185/> (reference date: 27.03.2017).
9. Vantuz – the tool of a bicycle activist // VELONATION.NET: daily Internet-edit. 2017. URL: <https://velonation.net/2017/06/02/plunger/> (reference date: 09.09.2017).
10. Green Climate Adaptation // TREDJENATUR.DK : 2015. URL: <http://tredjenatur.dk/en/portfolio/green-climate-adaption/> (reference date: 25.09.2017).
11. Meridian I Rode Hiroshima's Epic, 70-Kilometer Bike Route // MERIDIAN.NAT : daily Internet-edit. URL: <https://www.meridian.net/2016/9/26/13059164/japan-tours-cycling-longform-essay> (reference date: 03.09.2017).
12. A house for cyclists will help to abandon cars // ARCH: SPEECH.RU: daily Internet-edit. 2010. URL: <http://archspeech.com/article/dom-dlya-velosipedistov-pomozhet-polnost-yu-otkazat-ot-avtomobiley> (reference date: 22.09.2017).
13. Tunnel in Amsterdam laid out with tiles with drawings // ETODAY.RU: daily Internet-edit. 2012. URL: <http://www.etoday.ru/2016/03/tonnel-v-amsterdame-vylozhenny-plitkoy-s-risunkami.php> (reference date: 25.06.2017).
14. 10 most impressive infrastructure facilities for cyclists // NOVATE.RU: daily Internet-edit. URL: <http://www.novate.ru/blogs/060414/25954/> (reference date: 25.09.2017).
15. Nadirova H.G. Development of the town-planning culture of the Kazan Khanate // Zolotoordynskoe obozrenie. 2014. № 2. P. 147–171.





УДК 712.25

**Исмагилова С.Х.** – кандидат архитектуры, доцент

E-mail: [grado@kgasu.ru](mailto:grado@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **Формирование природного каркаса в структуре крупного промышленного города**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью статьи является выявление путей реорганизации существующей системы природного комплекса крупного промышленного города, направленных на решение острейших экологических проблем, сложившихся в г. Магнитогорске, являющегося центром развития крупнейшего металлургического комбината страны.

*Результаты.* В результате исследования выявлены и проанализированы характерные структурообразующие факторы, влияющие на формирование городского природного каркаса г. Магнитогорска. Приводятся результаты оценки сложившегося природного комплекса города, а также направления его функционально-планировочной и ландшафтной реорганизации.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для градостроительной науки состоит в выявлении планировочных приемов, направленных на преобразование существующего природного комплекса в устойчивый природный каркас – ландшафтно-экологическую систему, способствующую разрешению градоэкологических проблем и дальнейшему устойчивому развитию города.

**Ключевые слова:** природный каркас, ландшафтно-экологическая система, зеленые коридоры, устойчивое развитие.

В ряду стратегических приоритетов современного градостроительства важнейшей задачей является необходимость решения экологических проблем в сложившихся городах, как неперемное условие обеспечения их устойчивого развития и повышения качества городской среды. Стратегия устойчивого развития города предусматривает взаимодействие с природой, сохранение её самоподдерживающего состояния в условиях антропогенных воздействий<sup>1</sup>. Данная задача особенно актуальна для городов, обладающих крупными градообразующими промышленными производствами с зонами высокой степени вредности. При формировании генеральных планов промышленных городов первоочередной необходимостью является внедрение и осуществление технологических мероприятий, модернизирующих производство и уменьшающих вредоносное влияние на городскую и природную среду. Однако данный подход не всегда способен оперативно быть внедрен, требует времени, системного подхода и должен сопровождаться соответствующими мероприятиями градостроительного характера. В связи с этим генеральные планы не ограничиваются вопросами территориального и функционального зонирования, но также включают комплексное рассмотрение всех факторов, формирующих качество среды проживания – транспортное обеспечение, уровень воздействия вредных выбросов, надежность социальных и инженерных инфраструктур, полноценность системы озеленения и благоустройства и пр.

Одной из тенденций, характеризующей современное развитие производства и способствующей сокращению негативного влияния крупных промышленных объектов является территориальная концентрация производства, формирование промышленных районов и узлов, сосредоточенных на единой компактной территории<sup>2</sup>.

Кроме того, традиционным приемом для снижения отрицательного воздействия промышленной зоны на городское окружение в зависимости от технологического процесса является установление определенных размеров санитарно-защитных зон.

<sup>1</sup>Градостроительный кодекс Российской Федерации (от 29.12.2004 г., № 190-ФЗ).

<sup>2</sup>Сосновский В. А. Планировка городов. М. : Высшая школа, 1988. 104 с.

Однако практика показывает, что санитарно-защитная зона отдельных крупных промышленных предприятий не всегда обеспечивает необходимых санитарно-гигиенических условий на примыкающих исторически сложившихся селитебных территориях. Укрупнение санитарной зоны или перенос промышленного комплекса на безопасное расстояние не всегда возможно и экономически оправдано. Более рационально при сложившейся градостроительной дислокации промышленной и селитебной зон добиваться более эффективного использования санитарно-защитных территорий, а также повышать устойчивость самой селитебной зоны.

Конструктивным механизмом реализации концепции устойчивого развития города и создания благоприятной для жизнедеятельности человека среды является формирование природного каркаса города. Являясь уникальным для каждого города, природный каркас основывается на сложившейся системе озелененных территорий с использованием системного подхода экологической ориентации с более углубленным учетом взаимосвязанных природных и градоэкологических составляющих [1, 2]. Рассмотрим особенности формирования природного каркаса на примере крупного промышленного города Магнитогорска.

Развитие г. Магнитогорска, возникшего в 30-е годы 20 века при металлургическом комбинате, было полностью подчинено интересам промышленности. Однако, следует отметить, что уже в первых концептуальных проектах генплана Магнитогорска 30-х гг. были представлены решения, направленные не только на поиск новых моделей развития социалистического города, но и на оптимизацию взаимодействия природной и урбанизированной среды, формируемой крупнейшим металлургическим предприятием<sup>3</sup>. В послевоенный период город обретает двухчастную структуру, определяющую четкое разделение города на промышленную левобережную зону и развивающуюся вдоль правобережной части реки Урал зону новых жилых районов. Следует отметить, что вопросам благоустройства и озеленения города, особенно в послевоенный период уделялось большое внимание. Несмотря на сложные климатические условия и бедность местной природной растительности озеленялись улицы, дворы, разбивались сады и скверы, благоустраивалось побережье акватории, разрабатывались эффективные приемы озеленения, способствующие улучшению городского микроклимата.

В дальнейшем в процессе интенсивного развития города и его населения, роста промышленного производства и добычи полезных ископаемых, развития транспорта, отсутствие достаточного внимания к вопросам природопользования в конечном итоге привело к созданию чрезвычайной экологической ситуации в городе – высокому уровню загрязнения воздуха, водных ресурсов, почв, деградации экосистем и существенному ухудшению состояния здоровья населения. Очевидно, что в городе имеет место существенное нарушение баланса между урбанизированной и промышленно насыщенной средой и природным комплексом не в пользу последнего, что подтверждается материалами исследований [3].

Анализ материалов действующего генплана г. Магнитогорска показал важность проблемы улучшения условий проживания и обеспечения комфортной среды с учетом благоприятных экологических и санитарно-гигиенических условий. В частности, это предлагается реализовывать за счет уточнения функционального зонирования территории и приведения его в соответствие с утвержденными проектами планировок и правилами землепользования и застройки города от 1.02.2016 г. Проектом также предусматриваются мероприятия по озеленению города – увеличению площади зеленых территорий, как общего пользования, так и специального назначения. Это позволит довести их примерно до 25 % от общей площади, а с учетом зоны коллективных садов – до 35 %. Однако, с учетом, сложившейся в Магнитогорске чрезвычайной экологической ситуации, мероприятий, предусматривающих лишь незначительное количественное изменение общей площади озелененных территорий, будет недостаточно, а потребуются корректировка всей системы озеленения с целью формирования устойчивого природного каркаса города.

<sup>3</sup>Иржи Груза. Теория города. – М.: Стройиздат, 1972. 246 с.

Комплексный анализ, существующего состояния природного комплекса города, особенностей его функционально-планировочной организации, экологических качеств ландшафтной составляющей показал наличие следующих проблем [4]:

- отсутствуют достаточные территориальные резервы в пределах правобережной зоны города для создания крупных общественных рекреационных территорий – парков общегородского и районного значения;

- отсутствует продуманная система благоустройства и озеленения прибрежной зоны р. Урал и водохранилища – главной природной доминанты города его воднозеленого диаметра;

- система озеленения правобережной части города, главным образом формируется за счет дисперсной системы малых озелененных пространств – скверов и садов, размещенных неравномерно в структуре сложившейся жилой застройки;

- существенным дополнением, влияющим на формирования планировочной структуры озелененных пространств правобережья, являются лишь территории садоводческих товариществ, относящиеся к категории специализированных ландшафтных объектов;

- недостаточно выявлена система линейного озеленения вдоль транспортных коммуникаций, образующего зеленые связующие коридоры;

- не выявлены планировочные связи внутригородской системы озелененных территорий и пригородного пояса;

- функциональный состав элементов природного комплекса недостаточно разнообразен и требует оптимизации в соответствии с современными социальными потребностями;

- в левобережной промышленной зоне открытые природные территории рассматриваются лишь как «фоновый» резерв для развития объектов промышленного и коммунального использования;

- санитарно-защитные разрывы между промышленной территорией и сохраняющимися довоенными жилыми поселениями не соответствуют нормативным требованиям для производств такого масштаба;

- отсутствуют защитные зелёные полосы-«коридоры» вдоль крупных транспортных артерий, размещенных в промышленном левобережье;

- обширные открытые пространства левобережной зоны структурно и функционально не организованы;

- отсутствуют планы по рекультивации обширных нарушенных территорий левобережной части города.

Формирование природного каркаса в пределах Магнитогорска и его пригородного окружения определяется особенностями сложившейся функционально-планировочной структуры города, природными территориями и системой озеленения. Наличие двух диаметрально противоположных по функциональному использованию и планировочной структуре зон – левобережного (промышленного) и правобережного (селитебного) районов города определяет различные подходы к организации природного каркаса каждого из них. Предлагаемое решение планировочной организации природного каркаса города предусматривает дифференцированный подход его формирования в указанных зонах в зависимости от характера застройки, назначения территорий, доли природных и озелененных территорий в их структуре.

Объединяющим, а одновременно и дифференцирующим фактором функционально-планировочной структуры г. Магнитогорска является главная его планировочная ось и основная ландшафтная доминанта города – водно-зеленый диаметр – река Урал и примыкающие к нему прибрежные территории. Создание непрерывной и благоустроенной территории прибрежной зоны реки с системой разнообразных рекреационных и общественных узлов – это сложная градоэкологическая задача, которая будет сопряжена с предварительным осуществлением мероприятий по очистке русла реки и модернизацией системы очистных сооружений.

Второй объединяющей ландшафтной доминантой, влияющей на экологические и рекреационные условия города, является внешний природный пояс, примыкающий к границам города и обеспечивающий контакт с пригородными ландшафтами.

Основополагающее значение для формирования внешнего пояса Магнитогорска будет иметь не только сохранение природоохранных территорий в верхнем течении р. Урал, но также усиления экологической эффективности природного каркаса путем создания ветрозащитных посадок и зеленых поясов за границами города.

Существенное значение для формирования системы озеленения и рекреаций города играют зоны размещения обширных территорий садоводческих товариществ, являющихся в условиях Магнитогорска не только важным ландшафтно-рекреационным резервом, но и крупным структурным элементом зеленого каркаса города. Они образуют в правобережном районе «зеленое полукольцо», отделяющее районы сложившейся жилой застройки от районов нового строительства, обеспечивая ветрозащиту и непрерывность озеленения. В левобережной части города садоводства образуют крупнейшие массивы территорий в прибрежной зоне водохранилища.

Формирование природного каркаса правобережной части города связано с поиском дополнительных и относительно небольших открытых территорий в виду сложившейся квартальной застройки и отсутствия резервов свободных пространств, выделенных под общественное озеленение. В данной зоне формирование природного каркаса будет зависеть от морфологии жилой застройки и доли имеющихся природных пространств в их структуре. Сложившаяся система застройки представляет собой средне- (1950-1960 гг.) и крупномасштабную (1970-1990 гг.) сетку жилых кварталов, дополненную дисперсным размещением объектов малого озеленения – садами и скверами [5].

Увеличение площади озелененных территорий и создание более устойчивой структуры предлагается реализовать путем преобразования сложившегося «дисперсного» озеленения в непрерывную «сетчато-узловую» систему озеленения, образованную дополнительными малыми садами и скверами, равномерно распределяемыми в застройке и связанных линейной системой озеленения – благоустроенными улицами, пешеходными связями, бульварами и пр. Создание обширной системы «зеленых коридоров» позволит увеличить количество зелени в городе, благоустроит пешеходные связи, обеспечит контакт с ландшафтными доминантами и всеми уровнями застроенных пространств. Наряду с «достройкой» крупномасштабной сетки природного каркаса предлагается создание мелкомасштабной сетки зеленых коридоров – внутриквартальных проездов и пешеходных пространств. В новых предлагаемых к застройке периферийных жилых районах следует также предусмотреть «зеленые коридоры», связывающие город с пригородным поясом, а также озеленение и благоустройство новых общественных узловых пространств [4, 6].

В построении устойчивого природного каркаса жилого правобережья важен поуровневый подход [7, 8], рассматривающий формирования каркаса, как на уровне макросреды – уровне взаимодействия города и его ландшафтных доминант с пригородной зоной, так и на уровне мезосреды, обеспечивающем единство ландшафтных доминант и системы внутригородского озеленения (парков, садов, скверов) [9, 10].

Проблема построения зеленого каркаса в пределах преимущественно промышленной левобережной зоны города значительно более сложна и обретает смысл только при осуществлении комплексного подхода с осуществлением технологических мер, направленных на значительное сокращение вредных выбросов, совершенствование очистных сооружений, строительство предприятий по утилизации технологических и бытовых отходов и пр.

Важным градостроительным преимуществом формирования левобережной промышленной зоны Магнитогорска является компактное размещение производственных предприятий и основного источника сырья – горы Магнитной, занимающих примерно 50 % данной территории. Концентрированное размещение производства позволяет более рационально использовать в качестве защитных ресурсов различные «экологические фильтры» – санитарно-защитные зоны, очистные сооружения и пр.

Следует отметить, что в пределах промышленной зоны имеются жилые образования, являющиеся как сохранившимися первыми рабочими поселениями 1930-1940-х гг., так и стихийно сложившимися в процессе развития города, которые находятся в наиболее уязвимой дислокации относительно металлургического комбината и требуют, по меньшей мере, усиления санитарно-защитных зон за счет их расширения и интенсивного озеленения.

Значительные по масштабам свободные территории левобережной промышленной зоны города в генеральном плане обозначены как зоны перспективного развития и зоны зеленых насаждений общего пользования и частично входят в санитарно-защитные зоны мест добычи полезных ископаемых, отвалов, очистных сооружений. Для левобережья Магнитогорска очевидна необходимость проведения работ по рекультивации нарушенных промышленным и коммунальным освоением территорий, а также определение их дальнейшей функциональной принадлежности. Восстановление нарушенных территорий – единственный способ вернуть к жизни «лунные ландшафты», образовавшиеся в результате открытой добычи полезных ископаемых для чего рекомендуется проведение сложного комплекса биологической и технической рекультиваций. Огромные территориальные резервы, в дальнейшем могут быть рекомендованы для размещения экологически безвредных производств – ветропарков, тепличных хозяйств, питомников, садовых обществ, спортивных комплексов (аэродромов, автодромов) и пр.

Кроме того, свободные и санитарные территории левобережной зоны также нуждаются в осуществлении ветрозащитных посадок, технологии которых были разработаны специально для Магнитогорска с учетом климатических условий региона еще в Советское время. В условиях отсутствия естественных лесов, сложного ветрового режима обширные территории с ветрозащитными посадками будут дополнительным компенсационным противовесом отрицательному воздействию промышленной зоны.

Дополнительным средством, обеспечивающим ветрозащиту, может стать озеленение урбанизированных коридоров промышленных и коммунальных зон левобережья, формирующихся вдоль крупных транспортных артерий, которые свяжут в единую непрерывную систему крупные «площадные» элементы каркаса [11].

Рассмотренные планировочные приемы формирования природного каркаса г. Магнитогорска отнюдь не исчерпывают все возможности решения острых экологических проблем, характерных для многих промышленных центров страны, а требуют проведения дальнейшего комплексного исследования с привлечением специалистов различного профиля с целью разработки объективных рекомендаций для использования в процессе корректировки документов территориального планирования.

### **Заключение**

Концепцию построения природного каркаса города принято рассматривать как важный инструмент совершенствования, урбанизированной среды. В настоящее время это наиболее актуально для крупных промышленных городов, являющихся источником острых экологических проблем и разрешение которых требует комплексного подхода, включающего, в том числе формирование устойчивой и эффективной природно-ландшафтной подсистемы города [7, 8].

Для г. Магнитогорска, относящегося к числу наиболее загрязненных городов в РФ, тема создания природного каркаса в достаточной мере не разрабатывалась. Рассматривая природный каркас в качестве неотъемлемой части городской структуры, предлагается формировать его в соответствии с особенностями сложившихся функционально-планировочной и природно-ландшафтной подсистем г. Магнитогорска, а именно, с учетом разделения на два крупнейших планировочных района с различным морфологическим соотношением застроенных и открытых пространств. Однако морфологические отличия и особенности построения природного каркаса в каждом из планировочных районов города не только не исключают, но и предопределяют взаимообусловленность и скоординированность формирования системы в целом при условии рассмотрения города как единого объекта.

### **Список библиографических ссылок**

1. Fabiano de Oliveira. Green wedge urbanism: history, theory and contemporary practice. New York : Bloomsbury Academic, 2017. 285 p.

2. Краснощекова Н.С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов. М. : Архитектура-С, 2010. 183 с.
3. Генплан г. Магнитогорска. URL: [www.magnitkainfo.ru](http://www.magnitkainfo.ru) (дата обращения: 16.08.2017).
4. Исмагилова С. Х., Залетова Е. А., Головкина Л. О. Влияние ландшафтно-планировочного фактора на реорганизацию городской структуры // Известия КГАСУ. 2015. № 3 (33). С. 45–50.
5. Исмагилова С. Х., Залетова Е. А. Формирование ландшафтно-рекреационного и транспортного каркасов городского округа г. Казань // Известия КГАСУ. 2016. № 3 (37). С. 110–117.
6. Исмагилова С. Х., Залетова Е. А. К вопросу градостроительного развития малого города // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 162–166.
7. Исмагилова С. Х., Залетова Е. А. Вопросы структурно-планировочных преобразований районов массовой жилой застройки // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34). С. 129–134.
8. Mike Lydon & Anthony Garcia. Tactical urbanism. Island Press, 2015. 255 p.
9. Lesley Bain, Barbara Gray, Dave Rodgers. Living streets: strategies for crafting public space. Wiley, 2012. 316 p.
10. Хуснутдинова С. Р., Дембич А. А., Закирова Ю.А. Социально-экологические факторы формирования комфортной среды урбанизированных территорий // Географический вестник. 2016. № 4 (39). С. 28–35.
11. Колбовский Е. Ю. Ландшафтное проектирование. М. : Академия, 2008. 336 с.

**Ismagilova S.Kh.** – candidate of architecture, associate professor

E-mail: [grado@kgasu.ru](mailto:grado@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Formation of a natural framework in structure of the large industrial city**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the article is identification of the ways of reorganization of the existing system of a natural complex of the large industrial city directed to the solution of the acute environmental problems which have developed in Magnitogorsk, which is the development centre of the largest iron and steel plant of the country.

*Results.* As a result of a research the characteristic structure-forming factors influencing formation of a city natural framework of Magnitogorsk are revealed and analysed. There are given the results of assessment of the natural complex of the city and the direction of its functional, planning and landscape reorganization.

*Conclusions.* The importance of the received results for town-planning science consists in identification of the planning receptions directed to transformation of the existing natural complex to a steady natural framework – the landscape and ecological system promoting permission of urban environmental problems and further sustainable development of the city.

**Keywords:** natural framework, landscape and ecological system, green channels, sustainable development.

#### **References**

1. Fabiano de Oliveira. Green wedge urbanism: history, theory and contemporary practice. New York : Bloomsbury Academic, 2017. 285 p.
2. Krasnoshchekova N. S. Formation of natural framework in the general plans of cities. М. : Architecture-C, 2010. 183 p.
3. General plan of Magnitogorsk. URL: [www.magnitkainfo.ru](http://www.magnitkainfo.ru) (reference date: 16.08.2017).

4. Ismagilova S. Kh., Zalyotova E. A., Golovkina L. O. Landscape planning Influence on reorganization of city structure // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 3 (33). P. 45–50.
5. Ismagilova S. Kh., Zalyotova E. A. Forming of Landscape-Recreational and Transport Frameworks of the City of Kazan // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 3 (37). P. 110–117.
6. Ismagilova S. Kh., Zalyotova E. A. To the question of urban development of a small town // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 4 (38). P. 162–166.
7. Ismagilova S. Kh., Zalyotova E. A. Questions of restructuring of large scale housing estates // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 4(34). P. 129–134.
8. Mike Lydon & Anthony Garcia. *Tactical urbanism*. Island Press, 2015. 255 p.
9. Lesley Bain, Barbara Gray, Dave Rodgers. *Living streets: strategies for crafting public space*. Wiley, 2012, 316 p.
10. Husnutdinova S. R., Dembich A. A., Zakirova Yu. A. Socio-ecological factors of formation of a comfortable environment of urbanized territories // *Geograficheskiy vestnik*. 2016. № 4 (39). P. 28–35.
11. Kolbovskiy E. Yu. *Landscape planning*. M. : Academy, 2008. 336 p.



УДК 691.112

**Арленинов Д.К.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [dkarleninov@mail.ru](mailto:dkarleninov@mail.ru)

**Линьков Н.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nicklinkov@gmail.com](mailto:nicklinkov@gmail.com)

**Московский Государственный Строительный Университет**

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

### **Предложения по методике испытаний для оценки ползучести древесины**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Для учета ползучести возникает необходимость экспериментальных исследований прочности древесины при длительном влиянии нагрузки.

*Результаты.* Получена возможность при испытаниях на поперечный изгиб вычислять полные относительные деформации древесины с учётом ползучести. Предложена методика испытания образцов на поперечный изгиб.

*Выводы.* Значимость предлагаемой методики для строительной отрасли заключается в формировании подхода к определению дифференцированных значений модуля упругости древесины в зависимости от эксплуатационных факторов и длительности действия нагрузки. Полученные результаты позволят объективно учитывать процесс ползучести древесины при расчёте деревянных конструкций.

**Ключевые слова:** ползучесть, относительные деформации, длительные испытания, древесина, прогиб.

Интенсивное развитие вычислительной техники позволяет учитывать процесс ползучести древесины при расчёте деревянных конструкций. Однако, для реализации этих расчётов необходимы экспериментальные данные исследований древесины под длительной нагрузкой при различных уровнях напряжений. Ранее таких исследований было крайне мало, в первую очередь, в связи с отсутствием стандартных методик, а также с большими затратами на установки и стационарные измерительные приборы. Предлагается методика проведения длительных испытаний в режиме «изгиб», отличающаяся от методик проводимых ранее аналогичных испытаний на рычажных или пружинных установках в режиме «сжатие» и «растяжение». Схема приложения нагрузки при изгибе позволяет вычислять полные относительные деформации древесины с учётом ползучести, по всей длине пролёта образца, посредством замера фактического прогиба после затухания деформаций. Предлагается алгоритм вычисления относительных деформаций при испытаниях. Приводятся результаты пробных образцов, относительные деформации которых сравниваются с нормативными данными. Предложенная методика позволяет визуальные замеры относительных деформаций заменить вычислениями, а также позволяет обойтись без значительных материальных затрат на изготовление рычажных и пружинных установок и стационарных измерительных приборов.

Ограниченные объёмы применения деревянных конструкций в прошлом веке, основную номенклатуру которых составляли статически определимые конструкции, сказались и на научно-исследовательских работах по оценке механических свойств древесины. Приоритетным направлением являлась прочность древесины, и в первую очередь длительная прочность, чему были посвящены в основном как теоретические, так и экспериментальные исследования. Вопросы деформационных характеристик отходили на второй план и, по большому счёту, ограничивались стандартными испытаниями для определения модулей упругости, коэффициентов Пуассона вдоль и поперёк волокон, а также построениями диаграммы «напряжения – относительные деформации» при прессовых испытаниях для попыток нелинейных расчётов. Длительных испытаний для оценки ползучести древесины было крайне мало, а построением диаграмм нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями во времени, а также их аппроксимаций с целью практического применения не занимались в силу ограниченности применения численных методов расчётов. В линейных расчётах деревянных элементов на устойчивость и по деформированной схеме ползучесть учитывалась в нормах проектирования



деревянных конструкций СНиП II-25-80 длительным модулем упругости, равным  $300R$ , либо, при расчёте на прогиб понижающим коэффициентом  $0,7$  к жёсткости изгибаемой конструкции. Эти нормативные величины предполагают  $12\%$ -ю стандартную влажность древесины, основной показатель влияющий на ползучесть древесины. В основу этих расчётных предпосылок были положены как теоретические исследования, так и результаты экспериментальных исследований при длительном действии нагрузки, проведённые более полувека тому назад, которые ныне вызывают сомнения у ряда специалистов. В последнее время все чаще встречаются публикации по уточнению и совершенствованию нормативной методики расчета деревянных элементов по деформированной схеме и на устойчивость [1-9]. Основным объектом дискуссии является так называемый длительный модуль упругости, которым учитываются пластические деформации древесины в линейных расчетах. В этих работах, построенных, к сожалению, исключительно на теоретических исследованиях, предлагаются как различные фиксированные значения модуля упругости в  $4000$ ,  $6500$  и  $7500$  МПа, так и переменные значения в зависимости от уровня напряжения. Высказывалось также мнение о дифференциации модуля упругости в зависимости от сорта или класса прочности древесины и условий эксплуатации, породы древесины. Наконец, предлагается полная отмена расчетов сжато-изгибаемых древесных элементов в линейной постановке и замена их точными методами с углом нелинейных зависимостей. В результате всех этих дискуссий в последней редакции норм СП 64.13330.2011, как может показаться совершенно необоснованно, волевым путем, без проведения исследований, было почти в 2 раза завышено значение длительного модуля упругости. Чтобы получить научно-обоснованную величину длительного модуля упругости и подтвердить или опровергнуть все сомнения необходимо проведение длительных испытаний большего количества образцов из древесины. Окончательным результатом этих исследований должна быть также диаграмма работы древесины с учётом ползучести для нелинейных расчётов, которые ныне требуются в связи с широким распространением статически неопределимых клеёных деревянных конструкций. В связи с этим была поставлена задача предложить методику проведения длительных испытаний древесины при постоянной влажности, чтобы получить достоверные результаты, необходимые для построения нелинейной зависимости между напряжениями и относительными деформациями при уровне напряжений, не превышающих расчётные сопротивления древесины. В тоже время проводились теоретические исследования [9, 10, 11, 12], в которых оценивалось значительное влияние влажности древесины на снижение модуля упругости во времени при эксплуатации деревянных конструкций в течении 50-ти лет. Но в этих исследованиях не акцентировалось влияние уровня напряжений на снижение модуля упругости. Как считал Ю.М. Иванов в своей работе «К методике определения деформаций деревянных конструкций», опубликованной в «Известиях вузов» раздел «Строительство», а так же рано ушедший из жизни В.А. Цапаев [10], в помещениях с нормальным режимом эксплуатации при относительной влажности воздуха  $60-75\%$  и с обычными сезонными колебаниями температуры и влажности, древесина будет иметь пятнадцатипроцентную влажность. Для оценки влияния влажности при длительной эксплуатации оба автора рекомендуют снижать величину модуля упругости. По мнению Ю.М. Иванова величина модуля упругости должна снизиться с  $10000$  МПа, до  $6900$  МПа. По данным В.А. Цапаева модуль упругости при тех же условиях эксплуатации должен снизиться до  $6400$  МПа.

Поэтому одним из основных факторов при проведении длительных испытаний древесины является выбор помещения с его температурно-влажностным режимом. Наличие постоянного температурно-влажностного режима в помещении, при котором образцы имели бы равновесную влажность не более  $6-7\%$  обязательно, т.к. при большей влажности будет искажаться действительное влияние уровня напряжений на деформативность. В идеале нужно стремиться к более «сухим» помещениям, но практически невозможно найти их для решения данной задачи.

Вторым важным фактором при проведении исследований ползучести древесины является режим нагружения. Обычно, при аналогичных по целям и задачам исследованиях, испытания проводятся на рычажных установках в режимах сжатия или растяжения. На образцах жёстко фиксируется измерительная база, и на этой базе измеряются деформации измерительным прибором с требуемой точностью. Следует отметить, что при испытании в режиме сжатия и растяжения всё сечение образцов находится под одинаковой нагрузкой.

Но с другой стороны, эти режимы испытаний требуют дорогостоящих и громоздких рычажных установок со стационарными, закреплёнными на образцах, несъёмными измерителями деформаций с ценой деления 0,001 см и менее. Сами приборы и крепление их на образцах требует также значительных материальных и трудовых затрат, а незначительная неточность при установке этих приборов даёт большую погрешность при измерении относительных деформаций. Поэтому предлагается альтернатива. Проводить длительные испытания в режиме «изгиб», при котором длительный модуль упругости вычисляется по формулам сопромата, подставляя в них зафиксированную величину прогиба в середине пролёта после затухания его во времени.

Для схемы с одной сосредоточенной силой, приложенной в середине пролёта:

$$E_{\text{дл}} = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot f} \quad (1)$$

Для схемы с двумя сосредоточенными силами, размещёнными на одинаковом расстоянии от опор:

$$E_{\text{дл}} = \frac{P \cdot a \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot J \cdot f} \quad (2)$$

где  $f$  – замеренная величина прогиба в середине пролёта, после затухания процесса приращения прогиба;

$l$  – пролёт образца;

$a$  – расстояние от опор до ближайших сосредоточенных сил;

$E_{\text{дл}}$  – длительный модуль упругости.

Получив фактическое значение длительного модуля упругости образца, относительные деформации можно вычислять, а не измерять. Вычисляются относительные деформации для крайних волокон в растянутой и сжатой зонах. Алгоритм вычисления относительных деформаций в любой момент проведения испытаний заключается в следующем. Независимо от схемы приложения и величины нагрузки одной или двух сосредоточенных сил определялись максимальные нормальные напряжения, которые затем усреднялись по длине пролёта, т.е. за базу для вычислений принимался весь пролёт. Такой подход объясняется предположением, что при изгибе накопление остаточных деформаций происходит линейно в зависимости от величины нормального напряжения на отдельных интервалах по длине пролёта (при этом не исключается, что такое предположение не вполне верное и накопление остаточных деформаций в зависимости от уровня напряжений нелинейно). Например, при схеме нагружения с двумя сосредоточенными силами, остаточные деформации по длине зоны «чистого изгиба» имеют максимум и накапливаются равномерно. Величина их значительно больше, чем деформации на интервалах от опор до точек приложения этих сил, которые накапливаются от нуля до максимума. А поскольку замеренный прогиб является фактическим показателем для единой оси деформирования, то за величину полных относительных деформаций следует принимать их усреднённые значения, которые зависят от усреднённых величин нормальных напряжений по длине пролёта и определяются по формуле основного закона механики:

$$e_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{уср}}}{E_{\text{дл}}}, \quad (3)$$

где усреднённые напряжения определяются для схемы испытаний с одной сосредоточенной силой в середине пролёта по формуле:

$$S_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{max}}}{2}, \quad (4)$$

а для схемы испытаний с двумя сосредоточенными силами, размещёнными на одинаковом расстоянии от опор:

$$S_{\text{уср}} = \frac{S_{\text{max}} \cdot (l - 2 \cdot a) + 2 \cdot \left(\frac{S_{\text{max}}}{2} \cdot a\right)}{l} \quad (5)$$

Преимущество проведения испытаний в режиме «изгиб» заключается, во-первых, в простоте проведения эксперимента в части приложения нагрузки, закрепления образцов, замера прогиба. При этом, правда, не всё сечение работает под расчётной нагрузкой, а только крайние волокна. Но, с другой стороны, и 90 % деревянных конструкций

работают в режиме «изгиб» и «сжатие с изгибом», когда лишь волокна в крайних зонах работают под расчётной нагрузкой. Во-вторых, вычисления всегда дают более точные результаты, чем измерения, тем более, учитывая при этом наличие лишь устаревших измерительных приборов на кафедрах вузов. Образцы при испытаниях «на изгиб» предлагается устанавливать в положение, где «пласть» является шириной сечения, а «кромка» высотой сечения. Таким образом, большее количество волокон древесины максимально включается в работу, чем при традиционных балочных испытаниях.

Проведение испытания в режиме «изгиб» по двум схемам нагружения сосредоточенными силами, позволяет также регулировать уровень напряжений от минимального до расчётного сопротивления древесины, что необходимо для построения диаграммы. Испытания в режиме «изгиб» с одной сосредоточенной силой предпочтительнее производить для определения относительных деформаций при малых уровнях напряжений, а испытания с двумя сосредоточенными силами предпочтительнее проводить для определения относительных деформаций при больших уровнях напряжений, близких к расчётному сопротивлению древесины.

Для апробации этой методики в МГСУ проведены в рамках обучения магистрантов длительные испытания деревянных образцов с целью учёта ползучести при расчёте деревянных конструкций, как в линейной, так и в нелинейной постановке.

Исходя из принципа приспособляемости к существующим возможностям для проведения длительных испытаний было выбрано помещение с постоянным температурно-влажностным режимом в подвальном этаже УЛК МГСУ, где в течение года температура и влажность практически не меняется. Образцы древесины, хранящиеся в отсеке кафедры МДК, имели стабильную влажность 6 %.

Выбор сечения образцов  $10 \times 2,0$  (h), см объяснялся геометрическим подобием с размером доски, которая принимается для подавляющего количества клеёных деревянных конструкций. Точный размер поперечного сечения определялся штангенциркулем по среднему значению замеров в трёх местах – в третях и в середине пролёта. Пролёт был принят длиной 1,5 м, исходя из необходимости получения максимальных нормальных напряжений, близких по величине к расчётному сопротивлению древесины, используя при этом стандартные грузы весом 10 и 20 кг. Древесина образцов – подмосковная ель с малым отношением «поздней» древесины к «ранней», что характерно для древесины, произрастающей в Московской области в течение последних десятилетий с короткими зимами. По местоположению и размерам сучков образцы можно отнести к 1-му сорту древесины.

Замер прогибов в середине пролёта осуществлялся прогибомерами Максимова с ценой деления 0,1 мм. Замеры прогибов осуществлялись до полного затухания приращения деформаций, т.е. в течение 8-ми месяцев. Один образец был испытан с приложением нагрузки сосредоточенной силой 20 кг в середине пролёта. Два образца испытывались с приложением 2-х сосредоточенных сил по 20 и 30 кг на расстоянии 37,5 и 25 см от опор. Таким образом, максимальные напряжения были близки к расчётному сопротивлению древесины. Результаты испытаний приведены в табл.

Таблица

1	№ образцов	Ц-1	Ц-2	Ц-3	
2	Сечение образцов, см	9,4×1,91 (h)	9,3×1,87 (h)	9,2×1,92 (h)	
3	$\sigma_{\max}/\sigma_{\text{ср}}$ МПа	13,2/6,6	13,9/10,4	13,3/16,1	
4	Фактический прогиб, см	$F_{\text{нпр}}$	2,61	4,01	4,48
		$F_{\text{дл}}$	2,34	5,47	6,15
5	Фактический модуль упругости, МПа	E	9868	9610	83500
		$E_{\text{дл}}$	7711	6972	6082
6	Полные относительные деформации во времени $\epsilon_{\text{дл}}$	0,00085	0,00149	0,00182	
7	Приведение результатов испытаний к древесине стандартной влажности	$E_{\text{дл}} 12$ МПа	6218	5622	4905
		$\epsilon_{\text{дл}} 12$	0,00106	0,00185	0,00226
8	Нормативные полные относительные деформации для древесины 1-го сорта	$\sigma=6,6$ МПа	0,00157		
		$\sigma=10,42$ МПа		0,00247	
		$\sigma=11,121$ МПа			0,00264

При этом, значения длительного модуля упругости образцов в табл. приведены к 12 %-й влажности по формуле:

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - k \cdot (w - 12)}, \quad (6)$$

где  $k = 0,04$  (при изгибе);  $w$  – влажность образцов в процессе испытаний.

Для оценки достоверности результатов проведённых испытаний сравним значения величин полных относительных деформаций образцов, приведённых к 12 %-й влажности, с нормативными значениями полных относительных деформаций, вычисленных для тех же уровней напряжений. В образце при уровне усреднённых напряжений, равных 11,1 МПа, фактические полные относительные деформации составили 0,00226. Нормативное значение этих деформаций при данном уровне напряжений равно 0,00264. Эта величина вычислялась по формуле (3), где за длительный модуль упругости принималось нормативное значение 300R для 1-го сорта древесины, которое учитывает ползучесть древесины во времени. Расхождение величин составило 15 %, что говорит о корректности предлагаемой методики испытаний для оценки ползучести древесины под нагрузкой. В образцах с меньшим уровнем напряжений расхождение фактических результатов с нормативными значениями увеличивается. Этот факт требует дополнительных испытаний образцов и дальнейшего осмысления.

Используя данную методику длительных испытаний можно в самых скромных условиях проводить исследования и накапливать результаты для создания базы данных, использование которой в дальнейшем позволит более достоверно учитывать процесс ползучести древесины в линейных и нелинейных расчётах.

### Список библиографических ссылок

1. Линьков В. И. Моделирование работы деревянных балок составного сечения на податливых связях с применением теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5. С. 30–35.
2. Линьков Н. В. Напряженно-деформированное состояние деревянных балок составного сечения на КМ-соединениях при длительном действии нагрузки // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 44–48.
3. Погорельцев А. А., Пятикрестовский К. П. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 33–35.
4. Пятикрестовский К. П. К вопросу о выборе модулей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность, устойчивость и по деформациям. Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 7.
5. Крылов С. К., Арленинов П. Д. Особенности моделирования составной конструкции из металла и железобетона на примере электрических порталов Зейской ГЭС, крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС, короны винтовой высотной башни «Эволюция» // Науч. тр. II Междунар. Конф. По бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.). М. : МГСУ. 2014. Т. 4. С. 121–128.
6. Арленинов Д. К. О новом нормативном значении модуля упругости древесины // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 19–20.
7. Цапаев В. А. Оценка модуля упругости древесины конструкций // Жилищное строительство. № 2. 2003. С. 11–13.
8. Клименко В. З. Расчет деревянных конструкций по деформациям и на прочность по деформируемой схеме // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 67–73.
9. Клименко В. З., Михайловский Д. В., Коваленко М. С. Поиск истины в модулях упругости древесины при расчете сжато-изгибаемых элементов : сб. науч. тр. / ОГАСА. Одесса, 2012. С. 115–123.
10. Клименко В. З. Феноменологический подход расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 1. С. 7–11.
11. Михайловский Д. В., Коваленко М. С., Клименко В. З. Расчет верхних поясов ферм из клееной древесины : сб. научных трудов / ОГАСА. Одесса, 2010. С. 157–162.
12. Стоянов В. В., Острый Р. А., Масляненко Е. В., Богаченко А. В., Топалов П. П. Экспериментальные исследования деревянной балки с глубокой подрезкой на опоре : сб. научных трудов / ОГАСА. Одесса, 2006. С. 209–214.

**Arleninov D.K.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [dkarleninov@mail.ru](mailto:dkarleninov@mail.ru)

**Linkov N.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [nicklinkov@gmail.com](mailto:nicklinkov@gmail.com)

**Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26

### Methods of experimental research to value for the creep of the wood

#### Abstract

*Problem statement.* In order to take creep into account, there is a need for experimental studies of the strength of the wood with a prolonged effect of the load.

*Results.* It is possible to calculate the total relative deformations of wood in the tests for transverse bending taking creep into account. A technique for testing specimens for transverse bending is proposed.

*Conclusions.* The importance of the proposed methodology for the construction industry is to form an approach to the definition of differentiated values of the modulus of elasticity of wood, depending on operational factors and the duration of the load. The obtained results will allow to take into account objectively the creep process of wood when calculating wooden structures.

**Keywords:** creep of wood, relative deformations, durable loading, wood, flexure.

#### References

1. Linkov V. I. Simulation of wooden beams on the composite section of compliant connections with the theory of composite bars // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2011. № 5. P. 30–35.
2. Linkov N. V. Intense-deformed condition of the wooden beams of the composite section by KM-connection with long-term loading // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. № 7. P. 44–48.
3. Pogorelcev A. A. Justification of standardized values in the calculation of the elastic moduli of wooden structures // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. №10. P. 33–35.
4. Pyatikrestovsky K. P. On the choice of elastic moduli in the calculation of wooden structures for strength, stability and deformation // *Stroitel'naya mekhanika I raschet sooruzhenii*. 2012. № 6. P. 7.
5. Krylov S. B., Arleninov P. D. The engineering approach to solving the problem of bending elastically creeping rod // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2013. № 2. P. 9–11.
6. Arleninov D. K. Calculation of wooden structures on the deformed scheme // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. № 1. P. 43–46.
7. Cepaev V. A. Modulus of elasticity evaluating for wood structures // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2003. № 2. P. 11–13.
8. Klimenko V. Z. Calculation of timber structures on the deformation and strength on the deformable circuit // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. P. 69–73.
9. Klimenko V. Z., Mikhailovsky D. V., Kovalenko M. S. The search for truth in the modules of the elasticity of wood in the calculation of compressed-bent elements : Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2012. P. 115–123.
10. Klimenko V. Z. Phenomenological approach to the calculation of squeezed-bent wooden elements // *Stroitel'naya mekhanika I raschet sooruzhenii*. 2011. № 1. P. 7–11.
11. Mikhaylovskiy D. V., Kovalenko M. S., Klimenko V. Z. Calculation of the upper belts of glued timber : Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2010. P. 157–162.
12. Stoyanov V. V., Ostryy R. A., Maslyanenko E. V., Bogachenko A. V., Topalov P. P. Experimental studies of a wooden beam with deep trimming on the support: Coll. of sci. papers / OGASA. Odessa, 2006. P. 209–214.

УДК 624.046.5

**Ахметзянов Ф.Х.** – кандидат технических наук, доцент**Радайкин О.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: olegxxii@mail.ru

**Ибрагимов Р.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: rusmag007@yandex.com

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### К эффекту «деформационного упрочнения» бетона при растяжении механической нагрузкой

#### Аннотация

*Постановка задачи.* В работе поставлена задача объяснить механизм «деформационного упрочнения» бетона, наблюдаемый в экспериментах при его растяжении механической нагрузкой – от начала нагружения до момента, предшествующего появлению видимой макротрещины.

*Результаты.* Для этого выполнен анализ аналогий в металлах и сплавах, изучен теоретический и экспериментальный материал. В итоге на основе модели Конрада получено расчётное неравенство для оценки касательных напряжений, соответствующих концу «деформационного упрочнения» в цементном камне (бетоне).

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности применения дислокационной теории к объяснению рассматриваемого процесса «деформационного упрочнения».

**Ключевые слова:** деформационное упрочнение, бетон, цементный камень, микроструктура, нарушение сплошности, дислокации

В современных нормах по проектированию железобетонных конструкций используют осреднённые прочностные и деформационные характеристики бетона без учёта влияния его структуры. Тем не менее, из материаловедения известно, что сопротивляемость бетона различного рода воздействиям определяется физико-химическими и механическим процессами, протекающим в цементном камне – важной составляющей бетона, определяющей его свойства – на различных масштабных уровнях рассмотрения: микро- ( $\sim 10^{-6}$  м), мезо- ( $\sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$  м) и макроуровнях ( $\sim 10^{-2}$  м). Учёт этих явлений, на наш взгляд, позволит более достоверно описывать поведение бетона под нагрузкой, прогнозировать его срок службы и решать другие актуальные практические задачи. В данной статье сделана попытка объяснить одно из таких явлений: «деформационное упрочнение» бетона, т.е. увеличение его модуля деформации при растяжении с ростом механической нагрузки. Сделать это предлагается с позиции процессов, протекающих в цементном камне.

Термин «деформационное упрочнение» принят нами по аналогии с металлами и сплавами, где при холодном деформировании возможен так называемый наклёп (нагартовка) – вид упрочнения вследствие изменения структуры металла и его фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации (рис. 1).

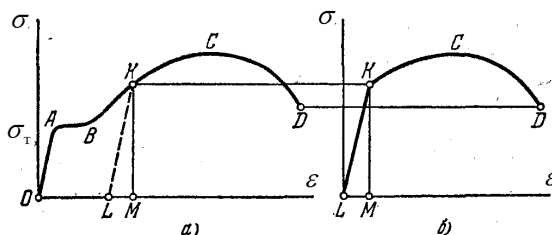


Рис. 1. Диаграмма деформирования металла к объяснению явления наклёпа:

а – первое растяжение образца до напряжений выше предела текучести  $\sigma_T$   
б – последующей разгрузкой (по линии  $0ABKL$ ); б – повторное нагружение образца

Наклёп сопровождается выходом на поверхность образца дефектов кристаллической решётки, увеличением прочности и твёрдости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера). Т.е. деформационное упрочнение в металлах и сплавах при наклёпе обусловлено торможением дислокаций (вследствие их размножения и увеличения плотности). – Чем труднее перемещаться дислокациям в материале, тем больше модуль деформации (производная напряжений по деформации).

Сам по себе термин «деформационное упрочнение» для бетона можно применить лишь условно, поскольку в результате действия механической нагрузки (деформаций) прочность материала не изменяется (увеличиваются только жёсткость, твёрдость и хрупкость), кроме того, механизм этого явления объясняется несколько иначе, чем в металлах и сплавах. Поэтому он взят нами в кавычки. Тем не менее, некая аналогия для бетона имеет место, о чём речь пойдёт ниже.

Ранее одним из авторов работы на основе анализа экспериментального графика зависимости « $\sigma$ - $\varepsilon$ », полученного для растянутой грани бетонного элемента в зоне чистого изгиба [1], было установлено, что модуль деформации бетона по мере нагружения от 0 до  $\sigma_{\max}$  ( $\sigma_{\max}=R_{bm}$  – напряжения в вершине диаграммы деформирования « $\sigma$ - $\varepsilon$ », рис. 2) увеличивается вплоть до появления трещин с раскрытием до 0,002...0,005 мм [2], что соответствует напряжениям примерно  $0,7\sigma_{\max}$ . Т.е. происходит нечто наподобие упрочнения поликристаллического материала с ионными химическими связями. Выше этого уровня напряжений появляется макротрещина и начинается «разупрочнение» материала.

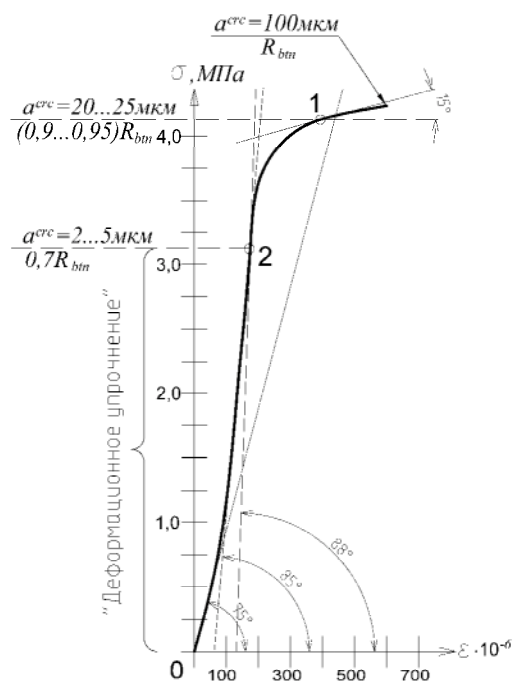


Рис. 2. Диаграмма деформирования растянутой грани изгибаемого бетонного образца (класс бетона В97,  $R_{bm}=4,4$  МПа) [2]: уровни нагрузки, при которых выявлены первые трещины: 1 – методом электротензометрии; 2 – голографической интерферометрии

Далее макротрещина переходит в магистральную, развивающуюся с большой скоростью (сопоставимой со скоростью звука в данном материале), что приводит к резкому падению модуля деформаций и в итоге к разрушению образца (разделению балки на две части).

Для рассматриваемого примера на рис. 3 наглядно показано изменение модуля деформации с ростом нагрузки. Выделены три характерных участка: 1 – участок упругой работы материала с постоянным значением модуля деформации, равным начальному  $E_{b,0}$  (до уровня напряжений  $\approx 0,3\sigma_{\max}$ ); 2 – участок «деформационного упрочнения» с увеличением модуля деформации от  $E_{b,0}$  до  $E_{b,\max}$  (до уровня напряжений  $\approx 0,7\sigma_{\max}$ ); 3 – участок

«разупрочнения» – резкое падение модуля. При этом на рис. 3 помимо экспериментальной кривой «1» показана также некоторая аппроксимирующая кривая «2», не учитывающая «упрочнение» бетона. – Такая кривая принимается в качестве допущения при теоретических построениях в большинстве научных работ и в Нормах по проектированию.

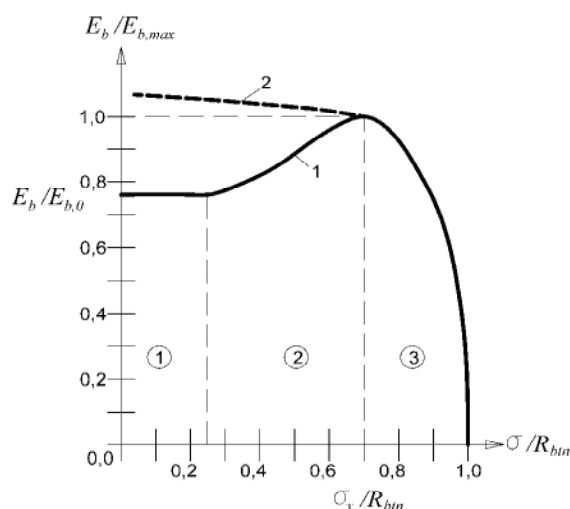


Рис. 3. Изменение модуля деформаций бетона с ростом нагрузки:

1 – кривая, полученная на основании результатов [2];

2 – аппроксимирующая кривая, не учитывающая эффект «деформационного упрочнения» бетона

Для объяснения явления «деформационного упрочнения» в бетоне обратимся к аналогии в металлах более подробно. В литературе их деформационное упрочнение связывают с упрочняющей ролью границ зерен и сводят к «барьерному эффекту», а также усложнению деформации при пластическом течении и взаимодействии дислокаций. При этом напряжение начала текучести  $\sigma_T$  описывается зависимостью, приведённой в работе Мешкова Ю. Я., Сердитовой Т. Н. Разрушение деформированной стали (Киев: Наукова Думка, 1989. 160 с.):

$$\sigma_T = \sigma_{0T} + k_T d^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{0T}$  – температурно-зависимая часть предела текучести;  $k_T$  – опытная постоянная, зависящая от вида материала;  $d$  – размер зерна поликристаллического материала. Величина  $\sigma_{0T}$  состоит из нескольких компонентов:

$$\sigma_{0T} = \sigma_{n-n} + \sigma_n + \sigma_{np} + \dots, \quad (2)$$

где  $\sigma_{n-n}$  – напряжения Пайерлса-Набарро. Остальные составляющие правой части этой формулы связаны с особенностью структуры материала (металла). Известно, что наиболее сильной температурной зависимостью и наибольшей величиной в выражении (2) обладает именно эта составляющая –  $\sigma_{n-n}$ , которая отвечает за движение дислокаций по естественному рельефу решетки поликристалла.

В работе [3], уравнение (1) адаптировано для хромированной стали с различным содержанием добавки Хрома, что обеспечено введением дополнительных эмперических коэффициентов.

В работе [3] предпринята попытка объяснить конкретные физические механизмы, приводящие к зависимости (1) в металлах. Для этого используется закон упрочнения, явным образом учитывающий физические особенности взаимодействия решеточных дислокаций с границами зёрен, а также кинетику накопления в них дислокаций ориентационного несоответствия.

Вопросы упрочнения интересуют и исследователей плёночно-тканевых композитов [5]. Моделирование структуры таких материалов предлагается выполнять методом конечных элементов, а полученные результаты затем описывать законом изотропного упрочнения вида  $\sigma_T = \sigma_{0T}(1 + C\varepsilon_i)$ , где  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформации,  $C$  – параметр упрочнения.



По аналогии с металлами на рис. 3 для бетона показаны напряжения  $\sigma$ , соответствующие окончанию «деформационного упрочнения», которые составляют примерно 0,7 от предельных  $R_{bt}$ .

Поскольку пластическая деформация в металлах осуществляется скольжением за счёт движения дислокаций в определённых плоскостях под действием касательных напряжений, логичнее рассматривать кривые деформирования не « $\sigma$ - $\epsilon$ », а « $\tau$ - $\gamma$ ». Приведённое напряжение сдвига в таком случае равно:

$$\tau = \sigma \cdot \cos\theta \cdot \cos\alpha, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол между нормалью к плоскости скольжения и осью растяжения;  $\alpha$  – угол между направлением скольжения и осью растяжения (когда ось растяжения перпендикулярна плоскости скольжения ( $\alpha=90^\circ$ ) или параллельна ей ( $\theta=90^\circ$ ), то  $\tau=0$ ;  $\tau=\tau_{\max}$  получается, если  $\theta=\alpha=45^\circ$ ).

В связи с этим уравнение аналогичное (2) было предложено Петчем и Холлом:

$$\tau = \tau_0 + kd^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – напряжения трения решетки или напряжения начала движения дислокации, когда  $d$  (диаметр зерна)  $\rightarrow \infty$ , что эквивалентно переходу в монокристалл;  $k$  – константа, учитывающая влияние структуры границ зерен, степени закрепления дислокаций и легирования.

В зарубежных работах [6, 7] благодаря мощному внедрению микроскопии и компьютерного анализа поверхности шлифов детально рассматривается вопрос о влиянии распределения зёрен по размеру на напряжения Петча-Холла в различных металлах.

В бетоне уравнение (4) подтверждено для гидросиликатов геля цементного камня в эксперименте Ю.М. Баженова с сотрудниками (Баженов Ю. М. Технология бетона. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 455 с.) – для частиц с размерами 0,16-2,89 мкм. Из эксперимента установлено, что процесс микро- и макроразрушения бетона и цементного камня начинается с зарождения и развития микротрещин скола в кристаллитах гидросиликатов, расположенных около концентраторов напряжений – пор и других технологических дефектов (рис. 4).

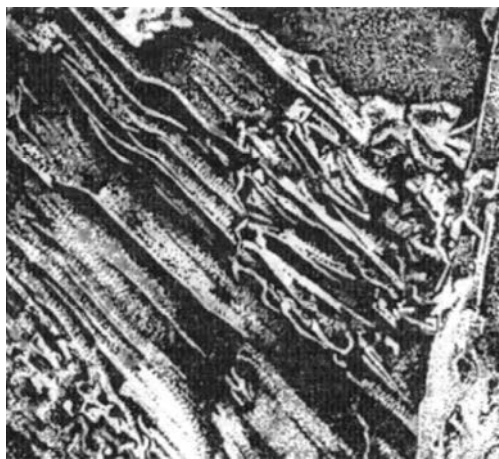


Рис. 4. Микроструктура цементного камня, на поверхности которого видны типичные ступеньки скола ( $\times 2200$ ) [4]

При этом выделяются два механизма возникновения ступеней скола: либо по плоскостям спайности при переходе трещин в кристаллит с другой ориентацией, либо в результате пластических сдвигов по плоскостям лёгкого скольжения, которые содержат молекулы подвижной воды. Было также отмечено, что в цементном камне возникшие трещины скола останавливаются границами кристаллитов, особенно в тех местах, где ориентация плоскостей спайности при переходе в соседний кристаллит скачкообразно изменяется. Обращает на себя внимание тот факт, что относительно низкая прочность цементного камня (например, по сравнению с металлами и сплавами) обусловлена неравномерным распределением в нём продуктов гидратации. Также в эксперименте установлено влияние на структуру цементного камня и бетона комплексных добавок,

способствующих улучшению микропластических свойств кристаллитной структуры, уменьшению размеров зерен и пор цементного геля и более равномерному их распределению в микрообъемах.

Отметим, в физике твердого тела было установлено, что при растяжении, ионные и ковалентные кристаллы металлов с объемно-центрированной гексагональной плотно упакованной структурой разрушаются хрупко – сколом, особенно при низких температурах и при обычных температурах для таких хрупких металлов, как молибден (Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 144 с.). Кроме того, известно, что кристаллы цементного камня (бетона) так же в основном объемно-центрированные с гексагональной плотно упакованной структурой (Кузнецова Г. В., Кудряшов И. В., Тимашев В. В. Физическая химия вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1989. 384 с., Справочник по химии цемента под ред. Волконского В. В., 1980. 224 с.). Такие кристаллы разрушаются хрупко и именно благодаря этому, а также капиллярно-пористой структуре цементный камень и бетон в целом являются квазихрупкими. Таким образом, аналогия хрупких металлов и бетона (цементного камня) – очевидная.

В общем виде механизм хрупкого разрушения бетона можно исследовать на основе компьютерного моделирования его атомной структуры, как это сделано в работе [8] для калициевого гидросиликата – основной составляющей цементного камня.

Альтернативную для выражений (1) и (4) модель, описывающую упрочнение металлов, предложил Конрад (Конрад Х. Модель деформационного упрочнения для объяснения величины зерна на напряжения течения металлов // Сверхмелкое зерно в металлах. М.: Металлургия, 1973. С. 206–219), согласно которой рост напряжений течения при уменьшении  $d$  связывается с резким увеличением плотности дислокаций  $\rho$  (линейных дефектов или нарушений кристаллической решетки твердого тела, существенно влияющих на механические и другие физические свойства). В этой модели для гомогенного распределения дислокаций напряжения сдвига по Тейлору равно:

$$t = t^* + aGb\sqrt{r}, \quad (5)$$

где  $t^*$  – вклад различных структурных факторов, не включённых во второе слагаемое правой части формулы;  $a$  – коэффициент, величина которого различна на разных стадиях;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решетки вокруг дислокации);  $\rho$  – плотность дислокаций.

К высокопрочным сплавам алюминия эта модель развита в работе [9].

Соотношение Петча-Холла вытекает из уравнения (5), если при данной степени деформации плотность дислокаций в материале пропорциональна обратному диаметру зерна. Такая зависимость может быть получена, если считать, что размер зерна влияет главным образом на длину свободного пробега (среднее расстояние  $\lambda$ , которое частица пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего). Выражая деформацию сдвига в виде  $\gamma = \rho bs$ , где среднее расстояние перемещения дислокаций  $s = Cd$ ,  $C$  – постоянная, то:

$$r = r_0 + \frac{g}{bCd}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность дислокаций. Подставляя значение  $\rho$  в уравнение (5), получим:

$$t = t^* + aGb\sqrt{r_0 + \frac{g}{bCd}}.$$

Выделяя в этом выражении параметр  $\tau_\mu$  (вклад в напряжение текучести начальных дислокаций), имеем:

$$t = t^* + t_\mu + aG\sqrt{\frac{gb}{C}}d^{-1/2}. \quad (7)$$

С учётом  $\tau_0 = \tau^* + \tau_\mu$  приходим к уравнению, эквивалентному соотношению Петча-Холла, причём параметр  $k$  зависит от степени деформации:

$$k = aG\sqrt{\frac{gb}{C}}.$$

Для оценки возможности применения модели Конрада к цементному камню (бетону), отметим, что в нём, как в типичном кристаллическом материале, ещё до появления псевдопластичности (до начала накопления микроповреждений), т.е. на условно упругом участке кривой «напряжение-деформация», возможны некоторые неупругие микроявления, вызванные движением дислокаций (Макридин Н.И., Максимова И.Н., Прошин А.П., Соломатов В.Н., Соколова Ю.А. Структура, деформативность, прочность и критерии разрушения цементных бетонов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. 275 с.), точечных дефектов, перемещением атомов на границах зёрен и т.д. Эти микроявления сопровождаются местной концентрацией напряжений и деформаций и служат причиной неоднородного внутреннего трения в кристаллитах и зёрнах цементного камня. Причём ещё в период формирования последних, т.е. при твердении бетонной смеси, под влиянием различных факторов (в том числе от усадки и начальных локальных микронапряжений) возникают многочисленные нарушения сплошности структуры: субмикротрещины, сравнимые с элементарной ячейкой кристалла, микротрещины – размерами до нескольких зёрен цементного камня, поры, полосы скольжения величиной  $0,0001 \dots 0,01$  мкм ( $10^{-7} \dots 10^{-5}$  см) и т.д. На наш взгляд все перечисленное может объяснено накоплением и движением дислокаций в цементном камне. По-видимому, впервые оценка концентрации дислокаций в этом материале была дана в работе [10]: до  $10^{11} \dots 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, т.е. почти как в металлах ( $10^{12} \dots 10^{13}$  см<sup>-2</sup>).

Отметим, что дислокации, зарождаясь в период формирования структуры цементного камня и бетона, затем в затвердевшем бетоне превращаются в основном в «сидячие», играют роль определённого тормоза для сдвиговых деформаций микроструктуры, но в дальнейшем при определённой концентрации могут способствовать появлению микроскола.

Косвенно всё перечисленное подтверждает возможность применения дислокационного механизма (7) для объяснения «деформационного упрочнения» цементного камня (бетона).

Для оценки эффекта упрочнения, из формулы (7) выразим модуль сдвига:

$$G = \frac{t - (t^* + t_m)}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}}$$

Воспользуемся известной зависимостью теории упругости  $E_b = 2G(1+\nu)$ , где  $\nu$  – коэффициент поперечных деформаций. Получим:

$$E_b = \frac{2(1+\nu)[t - (t^* + t_m)]}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}} \quad (8)$$

Если предположить, что на начальном этапе нагружения (до «упрочнения») связь между напряжениями и деформациями подчиняется закону Гука:

$$\tau = G\gamma \text{ или } E_{b0} = 2(1+\nu_0) \frac{t}{g},$$

где  $\nu_0$  – коэффициент Пуассона (для бетона  $\nu_0 \approx 0,2$ ), тогда, чтобы происходило «упрочнение» за пределами упругой стадии работы материала, необходимо выполнение следующего неравенства:  $E_b > E_{b0}$ , т.е.:

$$\frac{2(1+\nu)[t - (t^* + t_m)]}{a \sqrt{\frac{gb}{Cd}}} > 2(1+\nu_0) \frac{t}{g}$$

или

$$t > \frac{t^* + t_m}{1 - a \frac{1+\nu_0}{1+\nu} \sqrt{\frac{b}{Cdg}}} \quad (9)$$

Величины  $\tau^*$ ,  $\tau_u$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $C$ ,  $d$ , входящие в неравенство (9) подлежат экспериментальному уточнению для цементного камня и бетона.

**Общие выводы**

1. Сделана попытка объяснить механизм «деформационного упрочнения» бетона (цементного камня), наблюдаемый в экспериментах при его растяжении механической нагрузкой – от начала нагружения до момента, предшествующего появлению видимой макротрещины.

2. Для этого выполнен анализ аналогий в металлах и сплавах. В итоге на основе модели Конрада получено расчётное неравенство для оценки касательных напряжений, соответствующих концу «деформационного упрочнения» в цементном камне (бетоне).

3. Сделан вывод о возможности применения дислокационной теории к объяснению рассматриваемого процесса.

**Список библиографических ссылок**

1. Цилосани З. Н., Нижарадзе М. Д., Далакишвили Г. Л. Исследование трещинообразования в бетоне и железобетоне методом голографической интерферометрии // Бетон и железобетон. 1990. № 8. С. 8–10.
2. Ахметзянов Ф. Х. К особенностям деформирования, повреждаемости, изменения физико-механических характеристик бетона в конструкциях // Известия вузов. Строительство. 1993. № 9. С. 150–155.
3. Popov A. Non-parametric model of Holl-Petch relationship for chromium steel // Machines, Technologies, Materials. 2013. № 10. P. 13–15.
4. Селуков Д. Г., Волегов П. С. Исследование влияния размера зерна на предел текучести в двухуровневой модели на базе физической теории пластичности // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21, вып. 3. С. 1305–1307.
5. Каюмов Р. А., Мангушева А. Р. Предельный анализ для пленочно-тканевого композиционного материала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 6. С. 95–98.
6. Lehto, Pauli & Remes, Heikki & Saukkonen, Tapio & Hänninen, Hannu & Romanoff, Jani. Influence of grain size distribution on the Hall.Petch relationship of welded structural steel // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 592. P. 28–39.
7. Hanamura T., Qiu. H. Analysis of Fracture Toughness Mechanism in Ultra-Fine Grained Steel: Relationship Between Grain Size and Tensile Properties. Springer, 2014. P. 9–25.
8. Bauchy M., Laubie H., Abdolhosseini Qomi M. J., Hoover C. G., Ulm F.-J., Pellenq R.J.-M. Fracture toughness of calcium-silicate-hydrate from molecular dynamics simulations // Journal of Non-Crystalline Solids. 2015. № 419. P. 58–64.
9. Александров И. В., Чембарисова Р. Г., Латыпов М. И. Аналитическое моделирование напряжения течения сплава Al 1570, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Вестник УГАТУ. 2012. № 3 (48). С. 115–125.
10. Ахметзянов Ф. Х. К эффекту торможения силовой трещины в цементном камне (бетоне) усадочным трещинообразованием // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 14–18.

**Ahmetzjanov F.Kh.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Radaikin O.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [olegxxii@mail.ru](mailto:olegxxii@mail.ru)

**Ibragimov R.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [rusmag007@yandex.com](mailto:rusmag007@yandex.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## To the effect of «strain hardening» concrete under tensile mechanical load

### Abstract

*Problem statement.* In this work tasked to explain the mechanism of the concrete «strain hardening» which observed in experiments under tensile mechanical stress – from start of loading to the moment preceding appearance of the visible macrocrack.

*Results.* To do this, the analysis of the analogies in metals and alloys studied by theoretical and experimental material. In the end, based on the model of Conrad the obtained inequality to estimate the tangential stresses corresponding to the end of «strain hardening» in cement stone (concrete).

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is the application of dislocation theory to the explanation of the process of «strain hardening».

**Keywords:** work hardening, concrete, cement stone microstructure, discontinuity, dislocation.

### References

1. Tsilosani Z. N., Nizharadze M. D., Dalakishvili G. L. A study of cracking in concrete and reinforced concrete method of holographic interferometry // *Beton i zhelezobeton*. 1990. № 8. P. 8–10.
2. Ahmetzjanov F. Kh. To the characteristics of the deformation, damage, change of physico-mechanical characteristics of concrete structures // *Izvestiya vuzov. Construction*. 1993. № 9. P. 150–155.
3. Popov A. Non-parametric model of Holl-Petch relationship for chromium steel // *Machines, Technologies, Materials*. 2013. № 10. P. 13–15.
4. Selukov D. H., Volegov P. S. investigation of the effect of grain size on yield strength in the two-level model on the basis of the physical theory of plasticity // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2016. Vol. 21. Issue. 3. P. 1305–1307.
5. Kayumov R. A., Marusheva A. R. Limit analysis for film-fabric composite material // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. № 6. P. 95–98.
6. Lehto, Pauli & Remes, Heikki & Saukkonen, Tapio & Hänninen, Hannu & Romanoff, Jani. Influence of grain size distribution on the Hall.Petch relationship of welded structural steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 592. P. 28–39.
7. Hanamura T., Qiu. H. Analysis of Fracture Toughness Mechanism in Ultra-Fine Grained Steel: Relationship Between Grain Size and Tensile Properties. Springer, 2014. P. 9–25.
8. Bauchy M., Laubie H., Abdolhosseini Qomi M. J., Hoover C. G., Ulm F.-J., Pellenq R.J.-M. Fracture toughness of calcium-silicate-hydrate from molecular dynamics simulations // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2015. № 419. P. 58–64.
9. Alexandrov I. V., Chembarisov R. G., Latypov I. M. Analytical modeling of flow stress of Al alloy 1570 subjected to severe plastic deformation // *Vestnik USATU*. 2012. № 3 (48). P. 115–125.
10. Ahmetzjanov F. Kh. The effect of braking force cracks in the cement stone (concrete) shrinkage crack formation // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 14–18.

УДК 624.012.35/45

**Замалиев Ф.С.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [zamaliiev49@mail.ru](mailto:zamaliiev49@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок<sup>1</sup>**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы – выявление напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок на основе стального двутавра, армированных гибкими стержнями по огибающей эпюры изгибающих моментов.

*Результаты.* Меняя прочностные параметры арматуры и бетона, пролет балок, рассматривая различные варианты армирования, получены численные результаты несущей способности сталежелезобетонных балок разного строения и пролета. Экспериментальными исследованиями двух серий балок получены прочностные и деформационные показатели испытанных балок. Экспериментальные данные сравнены с результатами аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

*Выводы.* Сравнением результатов численных исследований с данными экспериментальных исследований подтверждена хорошая сходимость результатов и выгодность сталежелезобетонных балок армированных гибкой арматурой по огибающей эпюры моментов.

**Ключевые слова:** сталежелезобетонная балка, прочность, прогибы, численные исследования, эксперименты.

В последние годы в отечественной строительной практике наметилась тенденция расширения применения сталежелезобетонной конструкций, что актуализирует их дальнейшие исследования. Исследования направлены на выявление как доэксплуатационного напряженно-деформированного состояния изгибаемых балок и плит [1, 2], так и напряженно-деформированного состояния при действии внешних нагрузок [3-9]. Одновременно, с исследованиями известных и используемых на практике конструктивных решений, исследователи и инженеры предлагают новые технические решения сталежелезобетонных конструкций. В КГАСУ получено значительное количество патентов по сталежелезобетонным балкам и плитам [16-19]. Для исследования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций используют как аналитические [3-5], как составное сечение на основе аналитических диаграмм материалов [15], так и экспериментальные методы [10-13].

Многие исследователи для наиболее быстрого выявления напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций используют численные эксперименты, используя пакет программ. Однако, экспериментальные исследования, несмотря на материальные затраты и затраты на подготовительные работы, дают наиболее правдивые результаты, наиболее приближенные к эксплуатационным условиям поведения конструкций. Тем более сталежелезобетонные конструкции гражданских зданий, не так детально исследованы в отличие от мостовых конструкций.

Для численного эксперимента на ПК ANSYS сталежелезобетонные балки моделировались по схеме свободно опертой балки, нагруженные равномерно распределенной, а также двумя сосредоточенными силами, как в экспериментальных исследованиях. При численных исследованиях модель балки имела аналогичные геометрические и физические параметры, какие возможны в реальных условиях (например, пролет балки в 6, 9, 12 м), а также в запланированных испытаниях экспериментальных балок (рис. 1).

---

<sup>1</sup>Статья подготовлена по материалам исследований выполненных магистром Закировым Р.И., под руководством и с участием автора.

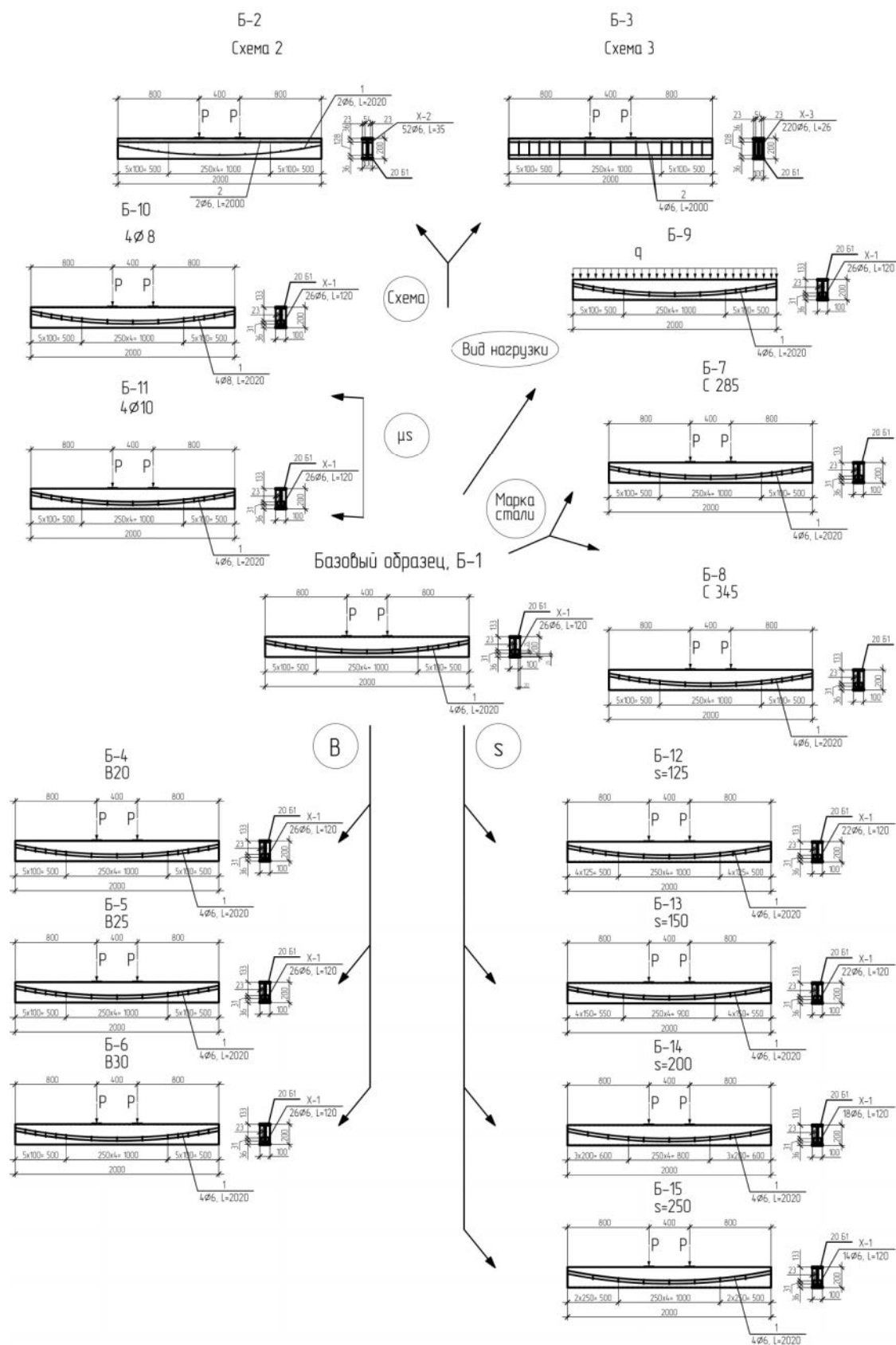
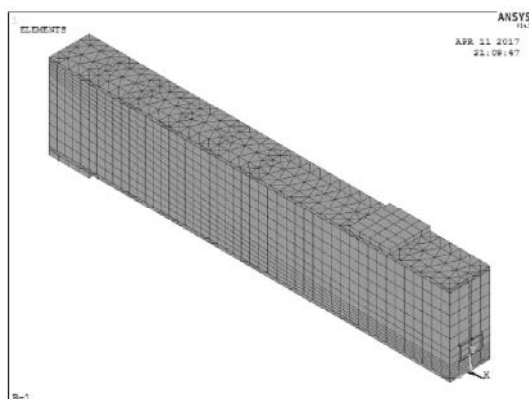


Рис. 1. Информационная схема принятых балок для численных исследований

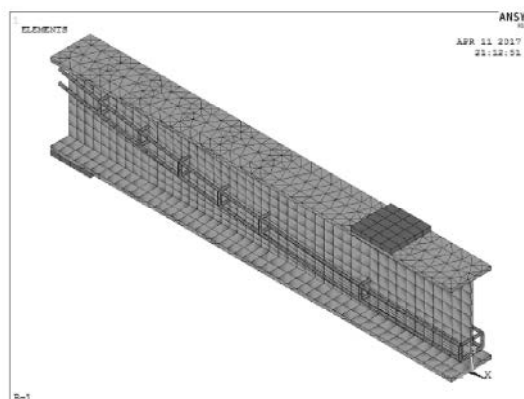
Задача программным комплексом решалась в три этапа: на первом этапе создавалась конечно-элементная модель сталежелезобетонной балки (рис. 2, 3), на втором этапе задавались жесткость изгибаемого элемента через жесткости двутавра, как жесткой

арматуры, гибкой арматуры и заполнителя – бетона. Третьим этапом было приложение внешних нагрузок: равномерно-распределенной нагрузки двух сосредоточенных сил – как в случае экспериментов. Изополю напряжений показаны на рис. 4.



а)

Рис. 2. Общий вид КЭ-модели в ПК ANSYS, КЭ для бетона – Solid 65



б)

Рис. 3. Двутавр смоделирован с помощью КЭ Solid 185, арматура и анкера – Beam188

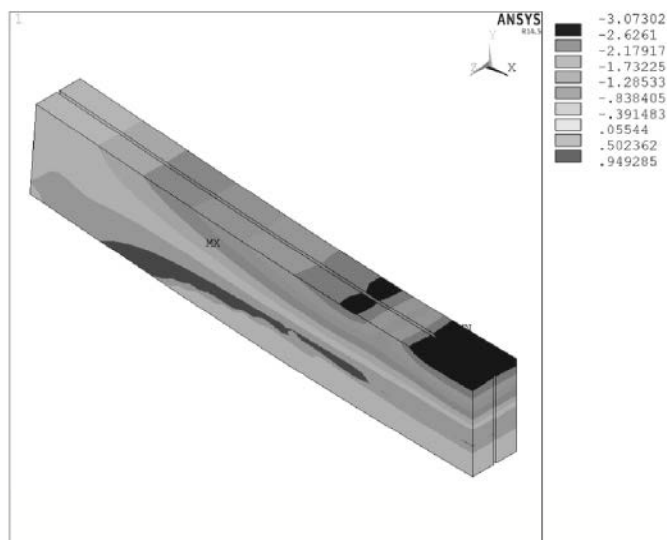


Рис. 4. Изополю напряжений балки

Численные расчеты выполнялись: для различных серий балок (рис. 4):

- а) с гибкой арматурой расположенной параллельно полкам двутавра;
- б) параллельно к верхней полке, а нижней полки – по огибающей эпюре момента;
- в) с двумя гибкими стержнями по огибающей эпюре моментов.

Класс бетона менялась от В15 до В30, класс стали двутавра от С245 до С345, класс гибкой арматуры А500С. Всего рассмотрено 29 факторов влияния, из которых 7 варьируемых (расположение и диаметр продольной арматуры, класс бетона и двутавра). При этом диаметры продольной арматуры и анкерных стержней взаимозависимые, остальные факторы – неизменные.

Численные эксперименты показывают, что схема армирования незначительно влияет на предельную несущую способность балок, несущая способность балок с арматурой по огибающей незначительно отличается от балок с традиционным армированием:  $P_{ult}=18,8$  т и 18,1 т, соответственно при пролетах 2 м, а с увеличением пролета до 9, 12 – выравниваются. При вариации класса бетона от В15 до В30 получаем, что нормальные трещины в балках с В30 появляются при  $P_{cr}=8,4$  кН, когда в балках В15, 20 – при  $P_{cr}=6,4$  кН. На повышение несущей способности влияет как увеличение класса стали двутавра, так и увеличение диаметра арматуры (% армирования) и диаметра



анкерных стержней. Изменение шага хомутов и анкерных стержней в опорной части балки незначительно влияет на предельную несущую способность балок.

Известны методы расчета железобетонных сечений с жесткой арматурой, основанные на методе предельного равновесия [14]. Предлагаемая методика – основанная на методике для железобетонных сечений с жесткой арматурой основывается на методе предельных состояний и позволяет рассчитывать сталежелезобетонные сечения с гибкой арматурой. В отличие от метода для железобетонного сечения с жесткой арматурой предлагаемая методика позволяет рассчитывать сталежелезобетонные сечения с расположением гибкой арматуры внутри стального двутавра.

Предельный изгибающий момент вычисляется по формуле:

$$M_{ult} = 0,5R_b b x^2 + R_{yn} [W_{pr} + (r - x)t_w] + R_{sn} A_s (h_0 - x) + R_{scn} A'_s (x - a'_{sred}), \quad (1)$$

где высота сжатой зоны:

$$x = \frac{2R_{yn} t_w r + R_{sn} A_s - R_{scn} A'_s}{R_b b + 2R_{yn} t_w}, \quad (2)$$

а приведенный центр тяжести арматуры у нижней грани:

$$a_{sred} = \frac{t_f^2 b R_{yn} + (t_f + 3a_1 + 2d_s) A_s R_{sn}}{2(t_f b R_{yn} + A_s R_{sn})}. \quad (3)$$

В случае двух сосредоточенных сил (как в случае испытаний) разрушающая сосредоточенная нагрузка на балку:

$$P_{ult} = \frac{2M_{ult}}{a}. \quad (4)$$

Для оценки деформативности (прогибов) воспользуемся известной в механике формулой [14], которая для принятых сечений в момент разрушения будет иметь вид:

$$f_{ult} = \frac{5}{48} \frac{M_{ult}}{E_b I_{bx} + E_s I_s + E_s I'_s + E_r I_r} l^2, \quad (5)$$

где:

$$I_{bx} = \frac{bx^3}{12} + \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2}\right)^2 bx - \text{момент инерции сжатой зоны бетона,}$$

$$I_s = A_s \left(\frac{h}{2} - a_s\right)^2 - \text{момент инерции растянутой гибкой арматуры,}$$

$$I'_s = A'_s \left(\frac{h}{2} - a'_s\right)^2 - \text{момент инерции сжатой гибкой арматуры,}$$

$I_r$  – момент инерции жесткой арматуры.

В табл. 1 приведены результаты сравнения прогибов в момент разрушения, полученные по различным методикам и эксперименту.

Таблица 1

#### Сравнение прогибов в момент разрушения

Серия	Прогиб при разрушении $f_{ult}$ , мм		
	Ansys	Предлагаемая методика	Эксперимент
Б-1	48 (-39,6 %)	55 (-21,8 %)	67
Б-2	92 (+43,8 %)	61 (-4,9 %)	64

В табл. 2 представлены результаты расчёта прочности сталежелезобетонных сечений в сравнение с опытными данными.

Таблица 2

#### Сравнение расчётных данных с опытными данными при определении несущей способности сталежелезобетонного сечения

Серия	Разрушающая нагрузка, т		
	Ansys	Методика	Эксперимент
Б-1	18,8 (+19,7 %)	16,7 (+6,4 %)	15,7
Б-2	18,2 (+18,2 %)	16,5 (+7,1 %)	15,4

Для исследования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонной балки и особенностей сечения с арматурой по огибающей эпюры моментов изготовлены и испытаны модели балок в масштабе 1:3, которые имели длину 2000 мм, высоту 200 мм (высота и ширина балки соответствовали размерам прокатного двутавра № 20Б1).

В боковых гранях для армирования использованы арматурные стержни  $\varnothing 6$  А500С (диаметр и класс арматуры, бетон приняты исходя из теоретических расчетов), анкерные стержни и хомуты –  $\varnothing 6$  А240 в  $\frac{1}{4}$  пролета на опоре размещены с шагом 100 мм, бетон принят В30 (рис. 5) и в средней зоне – 250 мм.

Для определения расчетных характеристик бетона были изготовлены стандартные образцы – кубики с размерами сторон 150 мм (рис. 6). При заполнении боковых граней уплотнение бетона производилось с помощью вибратора. Подготовку к испытаниям начали через 1 месяц, т.е. после приобретения бетона гостированной прочности. Опирали опытные балки осуществляли через катучие и не катучие катки ( $\varnothing 40$  мм) с рабочим пролетом – 1900 мм.

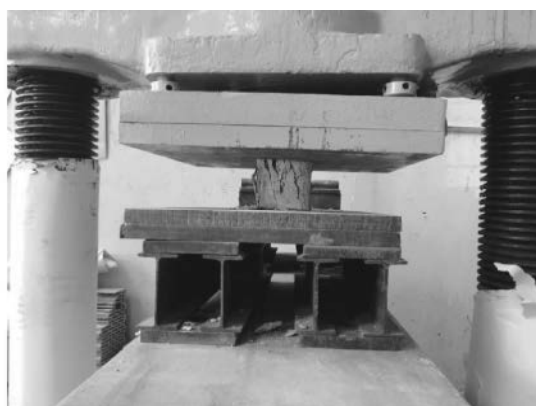
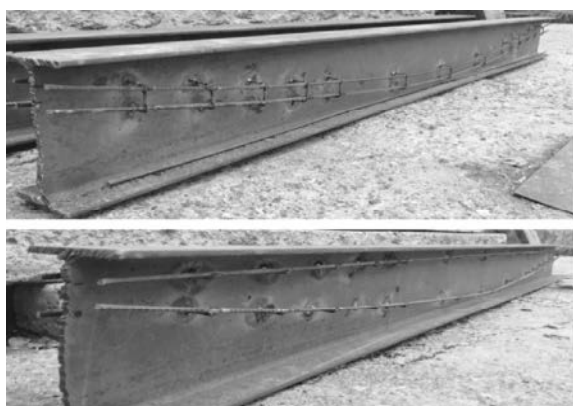


Рис. 5. Общий вид стальных балок до обетонирования      Рис. 6. Испытания стандартных кубиков

Для замера осадки опор устанавливали индикаторы часового типа (ИЧ), вертикальные деформации (прогибы) балки замерялись с помощью штангенциркуля приспособленного для установки в вертикальное положение приваркой специальной пяты (рис. 7). Для измерения деформаций (напряжений) в средней (с боков, снизу и сверху) и в опорной зоне с боков наклеивались тензорезисторы с базой 20 мм на сталь и 50 мм на бетон (рис. 8).

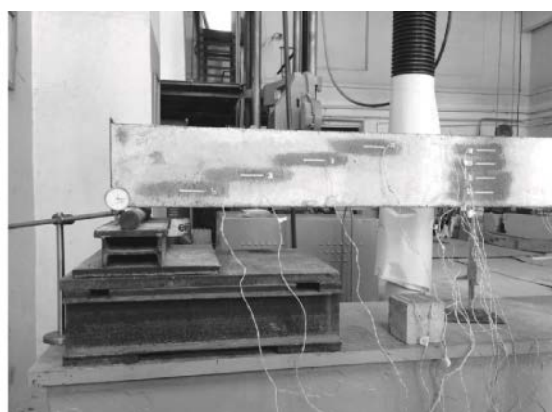


Рис. 7. Испытательный стенд с испытуемой балкой      Рис. 8. Балка с наклеенными датчиками

Момент образования трещин и характер их распространения наблюдали визуально, а для замера величин раскрытия трещин использовали микроскоп МБП-2 с  $24^{\times}$  кратным увеличением.

Испытания моделей балок проводились в лаборатории ЖБК КГАСУ, балки испытывались по схеме свободно опертой балки двумя сосредоточенными силами в средней части пролета, приложенными на расстоянии 400 мм друг от друга через траверсу. Нагрузка создавалась посредством гидравлической системы прессы УММ 200, равномерное распределение усилий по ширине сечения обеспечивалось постановкой жестких металлических прокладок, как в опорной зоне, так и в зоне приложения сосредоточенных сил через траверсу.

В процессе испытания измерялись деформации (напряжения бетона и стали) балки, прогибы, осадки опор и ширина раскрытия трещин. Деформации бетона и стали фиксировались тензодатчиками через аппаратуру АИД 4 с магазином переключателей.

После проверки работоспособности нагрузочной и силоизмерительной систем проводилось пробное нагружение балки нагрузкой, не превышающей 20 % от допустимой разрушающей и осуществлялось в 2-3 этапа. Целью пробного нагружения являлось изучение поведения сталежелезобетонной балки под нагрузкой и первичная проверка соответствия величин измеряемых параметров к ожидаемым. После необходимой выдержки под нагрузкой балка также по порядку разгружалась до нуля. В дальнейшем испытание проводилось нагружением ступенями по 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки. На ступенях во время выдержек фиксировались деформации бетона и стали, деформации опор, прогибы, характер развития и образования трещин, после появления – величина их раскрытия.

Момент образования трещин определяется визуально, а также на это и указывает тензодатчики сопротивления. Разрушающая нагрузка фиксировалась по показаниям шкалы часового типа испытательного прессы установки в момент физического разрушения образца.

Опытные образцы балок испытывали однократной кратковременной статической нагрузкой до полного разрушения с целью установления характера разрушения и закономерностей развития прогибов, деформаций бетона и стали при их совместном деформации в составе единой конструкции.

Статической нагрузкой до разрушения испытывались балки двух видов, отличающиеся разным расположением арматуры.

Во всех случаях опытные образцы балок разрушались по нормальному сечению в зоне чистого изгиба, в следствии увеличения пластических деформаций в средней части стальной балки.

Первые трещины бокового бетона, которым были замонтированы стальные двутавровые балки появились при нагрузке  $0,85P_{раз}$ , как правило, в сечениях под точками приложения нагрузки и имели незначительные раскрытия.

Развитие нормальных трещин (около 1 мм) в теле бокового бетона главным образом наблюдалось перед разрушением образца.

Оба способа расположения арматур балки оказались работоспособными, потому что выпучивания крайнего бетона из тела двутавровой балки не наблюдалось даже при предельных прогибах.

Общий вид, характер разрушения и трещинообразования балок, приведены на рис. 9-10.



Рис. 9. Балка серии Б1 после испытаний



Рис. 10. Характер разрушения сталежелезобетонных балок

На рис. 11-12 приведены графики прогибов балок при численных и натуральных экспериментах.

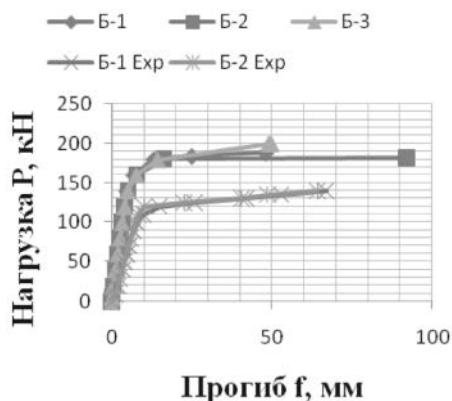


Рис. 11. График прогибов балок по результатам численных исследований

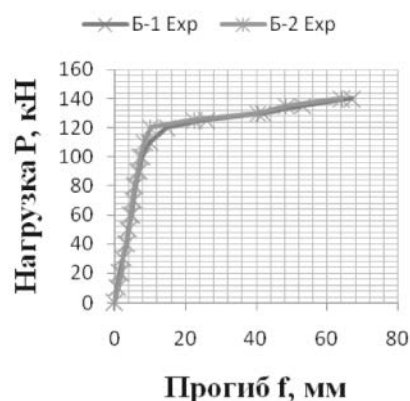


Рис. 12. График прогибов балок при натуральных испытаниях

По результатам численных исследований составлены эпюры напряжений, графики прогибов и наложены на такие же эпюры и графики по данным натуральных испытаний. Сопоставительный анализ показывает, что значения напряжений отличаются в пределах 18-20 %, а прогибов – до 43,8 %, тогда как напряжения в балках по предлагаемому методу расчета отличаются в пределах 6-7,1 %, а прогибы – до 4,9-21,8 %.

### Выводы

1. Предлагаемая методика расчета прочности сталежелезобетонных балок на базе методики расчета железобетонных балок с жесткой арматурой, позволяет для инженерных целей рассчитывать сталежелезобетонные сечения с гибкой арматурой параллельно полкам и по огибающей эпюре моментов.

2. Сравнения данных по предлагаемой методике расчета прочности показывают, что они отличаются от экспериментальных данных до +7,1 %, а от ANSYS до 19,7 %.

3. Сравнения результатов испытаний, численных экспериментов сталежелезобетонных балок показывает, что расположение гибкой арматуры по огибающей эпюре моментов может дать эффект до 5-8 % по сравнению с традиционным расположением гибкой арматуры.

### Список библиографических ссылок

1. Замалиев Ф. С. Выявление доэксплуатационных напряжений и деформации стальных балок – ребер сталежелезобетонного перекрытия // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 33–39.
2. Замалиев Ф. С., Биккинин Э. Г. Экспериментальные исследования начального напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок и плит // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 139–143.
3. Замалиев Ф. С., Мирсяпов И. Т. Учет податливости контакта слоев при расчетах прочности и малоциклового выносливости сталежелезобетонных элементов // Известия КГАСУ. 2010. № 2 (14). С. 126–133.
4. Замалиев Ф. С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 5. С. 38–41.
5. BSI (2010) BS 5950-3.1.A1. Structural use of steelwork in buildings. Design in composite construction. Code of practice for design of simple and continuous composite beams. BSI, London.
6. Roger P. Janson Designers' guide to eurocode 4: design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1. 2011. 412 p.

7. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam// Construction of unique buildings and structures, 2014. № 11 (26). P. 85–93.
8. Kim H.-Y., Jeong Y.-J. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting // Engineering Structures. 2010. P. 534–546.
9. Замалиев Ф. С., Биккинин Э. Г. К расчету сталежелезобетонных плит, подкрепленных ребрами // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 27–31.
10. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. № 114 (1). P. 171–180.
11. Замалиев Ф. С., Мирсаяпов И. Т., Замалиев Э.Ф. Экспериментальные исследования податливости контакта слоев сталежелезобетонных конструкций при малоцикловых нагружениях // Вестник МГСУ. 2011. № 2 (15). т. 2. С. 163–168.
12. Замалиев Ф. С., Морозов В. А. Натурные испытания и численные эксперименты сталежелезобетонного перекрытия // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 58–67.
13. Замалиев Ф. С. Эксперименты на сталежелезобетонных конструкциях по выявлению фактического напряженно-деформированного состояния, вплоть до их разрушения: сб. ст. VIII академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции / КГАСУ. Казань, 2014. С. 88–96.
14. Бондаренко В. М. и др. Железобетонные и каменные конструкции. М. : Высш. шк., 2011. 876 с.
15. Мирсаяпов И. Г., Абдрахманов И. С. Метод расчета прочности нормального сечения деревожелезобетонного изгибаемого элемента на основе аналитических диаграмм бетона и древесины // Известия ОрелГТУ. 2017. № 3/15. С. 40–45.
16. Сталебетонная балка : пат. 152451 Рос. Федерация. № 2014123278/03 ; заявл. 06.06.2014 ; опубл. 27.05.2015, Бюл. № 15. 3 с.
17. Сталебетонная балка : пат. 155972 Рос. Федерация. № 2014152336/03 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 01.10.2015, Бюл. № 30. 2 с.
18. Составная сталебетонная балка : пат. 155973 Рос. Федерация. № 2014152339/03 ; заявл. 23.12.2014 ; опубл. 23.10.2015, Бюл. № 31. 2 с.
19. Сталебетонная балка : пат. 166563 Рос. Федерация. № 2016114024/03 ; заявл. 11.04.2016 ; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. 2 с.

**Zamaliiev F.S.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [zamaliiev49@mail.ru](mailto:zamaliiev49@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Calculation and experimental studies of composite steel-concrete beams

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the work was to identify the stressed-deformed state of steel-reinforced concrete beams on the basis of a steel I-beam, reinforced with flexible rods along the envelope of the bending moment diagrams.

*Results.* By varying the strength parameters of the reinforcement and concrete, the span of the beams, considering various reinforcement options, numerical results are obtained of the bearing capacity of composite steel-concrete beams of different structures and span. Experimental studies of two series of beams have obtained the strength and deformation parameters of the tested beams. The experimental data are compared with the results of analytical calculations and computer simulation.

*Conclusions.* Comparison of the results of numerical studies with the data of experimental studies confirmed the good convergence of results and the profitability of reinforced concrete reinforced beams reinforced by the envelope of the moment diagrams.

**Keywords:** steel reinforced concrete beams, strength, deflections, numerical studies, experiments.

## References

1. Zamaliev F. S. Detection of pre-operational stresses and deformation of steel beams – edges of steel-concrete overlap // Vestnik MGSU. 2013. № 7. P. 33–39.
2. Zamaliev F. S., Bikkinin E. G. Experimental studies of the initial stressed-deformed state of steel-reinforced concrete beams and slabs // Izvestiya KGASU. 2015. № 2 (32). P. 139–143.
3. Zamaliev F. S., Mirsayapov I. T. Accountability of the contact of layers in calculating the strength and low cyclic endurance of steel-reinforced concrete elements // Izvestiya KGASU. 2010. № 2 (14). P. 126–133.
4. Zamaliev F. S. Inclusion of non-linear properties of materials and layer compliance in calculating the strength of composite slabs // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2013. № 5. P. 38–41.
5. BSI (2010) BS 5950-3.1.A1. Structural use of steelwork in buildings. Design in composite construction. Code of practice for design of simple and continuous composite beams. BSI, London.
6. Roger P. Jonson Designers' guide to eurocode 4: design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1. 2011. 412 p.
7. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam // Construction of unique buildings and structures, 2014. № 11 (26). P. 85–93.
8. Kim H.-Y., Jeong Y.-J. Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting // Engineering Structures. 2010. P. 534–546.
9. Zamaliev F. S., Bikkinin E. G. To the calculation of steel slabs reinforced with ribs // Izvestiya KGASU. 2014. № 3 (29). P. 27–31.
10. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. № 114 (1). P. 171–180.
11. Zamaliev F. S., Mirsayapov I. T., Zamaliev E. F. Experimental studies of the compliance of the contact of layers of steel-reinforced concrete structures under low-cycle loading // Vestnik MGSU. 2011. № 2 (15). vol. 2. P. 163–168.
12. Zamaliev F. S., Morozov V. A. Full-scale tests and numerical experiments of steel-reinforced concrete overlap // Vestnik MGSU. 2015. № 11. P. 58–67.
13. Zamaliev F. S. Experiments on steel-reinforced concrete structures to identify the actual stress-strain state, up to their destruction: Col. of art. of VIII academic readings RAASN – International Scientific and Technical Conference / KGASU. Kazan, 2014. P. 88–96.
14. Bondarenko V. M. Ferroconcrete and stone structures. M. : Vysh. shk., 2011. 876 p.
15. Mirsayapov I. G., Abdrakhmanov I. S. Method for calculating the strength of a normal cross-section of a wood-iron-bent element on the basis of analytical diagrams of concrete and wood // Izvestiya OrelGTU. 2017. № 3/15. P. 40–45.
16. Steel-concrete beam: patent 152451 of the Rus. Federation. № 2014123278/03 ; decl. 06.06.2014; publ. 05.27.2015. Bull. in № 15. 3 p.
17. Reinforced concrete beam: patent 155972 of the Rus. Federation. № 2014152336/03 ; decl. 12.01.2015; publ. 10.01.2015, Bull. in № 30. 2 p.
18. Compound reinforced concrete beam: patent 155973 of the Rus. Federation. № 2014152339/03 ; decl. 12.23.2014; publ. 10.23.2015, Bull. in № 31. 2 p.
19. Reinforced concrete beam: patent 166563 of the Rus. Federation. № 2016114024/03 ; decl. 11.04.2016; publ. 10.12.2016, Bull. in № 34. 2 p.

УДК 624.014

**Исаев А.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [isaev@kgasu.ru](mailto:isaev@kgasu.ru)

**Вахтель Р.Р.** – старший преподаватель

E-mail: [v\\_roman@kgasu.ru](mailto:v_roman@kgasu.ru)

**Закиров Р.А.** – аспирант

E-mail: [ramilzakirov1991@gmail.com](mailto:ramilzakirov1991@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

## **Численные исследования напряженно-деформированного состояния стальной рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – разработка новой, более экономичной по расходу металла, конструктивной формы рамных каркасов промышленных зданий из лёгких металлоконструкций (ЛМК), а также изучение её поведения под нагрузкой и определение области применения.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в изучении влияния расщепления карнизного узла на напряженно-деформированное состояние силовых элементов рамы. Также, в статье представлены варианты конструктивной проработки узловых соединений, и приведены результаты, являющиеся основой для дальнейшего изучения и совершенствования исследуемой рамы.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в новизне конструктивной формы рамного каркаса промышленных зданий, являющейся более экономичной по критерию расхода металла в сравнении с некоторыми типовыми рамами промышленных зданий. Также, развитие номенклатуры типовых ЛМК позволит повысить конкурентоспособность отечественных заводов и производителей, в сравнении с зарубежными.

**Ключевые слова:** рама переменного сечения, расщепление карнизного узла, анализ, статический расчет, численные исследования.

### **Введение**

Для снижения металлоемкости промышленных зданий, проектировщиками давно применяются металлические рамные конструкции, зарекомендовавшие себя как наиболее экономичные, с точки зрения материалоемкости, и легко возводимые. Как в зарубежной отрасли производства зданий из ЛМК [8], так и в отечественной, основными преимуществами являются легкий вес, серийность, быстрое и легкое возведение. В связи с этим, вопросы снижения расхода металла и трудозатрат по возведению конструкций будут всегда представлять интерес.

Одним из способов оптимизации является возможность изменения поперечного сечения элементов для более эффективного распределения материала и восприятия усилий. К примеру, изучением эффективности применения профилей с переменной по длине жесткостью занимаются многие зарубежные исследователи, выяснившие, что экономия при таком способе оптимизации может достигать 27 % [4].

Также, при оптимизации имеется возможность варьировать не только сечением силовых элементов, но и конструктивной формой всего каркаса. Интересная методика оптимизации, к примеру, при варьировании угла наклона ветвей колонны, подробно описана в [10].

При всех этих методиках нужно учитывать напряженно-деформированное состояние конструкции. В рамных конструкциях опасным местом является карнизный узел, из-за наибольшего изгибающего момента, который является расчетным при определении сечения силовых элементов рамы. Данный факт приводит к перерасходу металла в других частях конструкции. Для решения данной проблемы в [1] предлагается более рациональное применение в указанном узле сквозного сечения рамы, включающей стойки, ригели, и подкосы карнизной части (рис. 1).

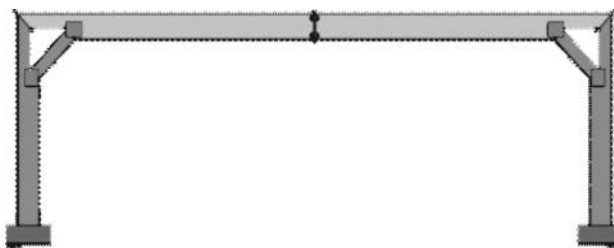


Рис. 1. Модель рамы с расщеплением карнизного узла постоянного сечения

При этом каждый подкос образован путем продольной резки профилей стыкуемых концов стойки и ригеля с последующим отгибом их нижних частей и соединенных между собой.

Расщепленный узел рамы, со стойками и ригелем постоянной жесткости, рассмотрен в [2], где методом сил, с использованием суперэлементного подхода [7, 8], была установлена возможность влияния геометрических параметров на весовые показатели рамы. В [3] были рассмотрены натурные испытания и сравнение НДС рамы сплошного постоянного сечения и рамы с расщеплением карнизного узла.

В связи с этим, двигаясь по направлению оптимизации массы, данная рама была модифицирована, и в статье рассмотрена как рама переменного сечения с расщеплением карнизного узла (рис. 2).

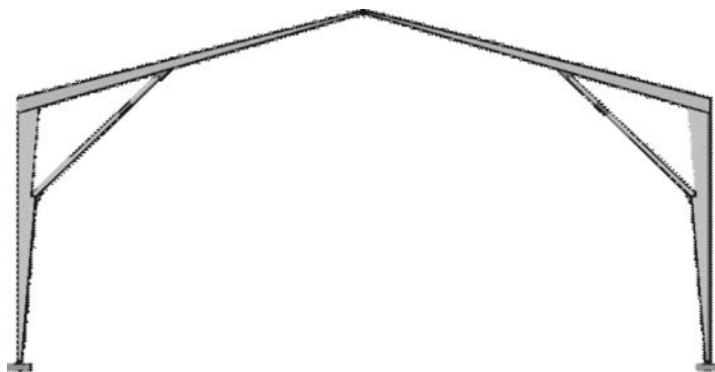


Рис. 2. Модель исследуемой рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла

#### **Ход исследований**

Конструкция имеет пролет 18 м, высоту карнизного узла 7,2 м, угол наклона ригеля  $15^\circ$ . Теоретические исследования по выбору оптимальных параметров представлены в [5]. Отметка стыка подкоса и стойки была принята на уровне 4,5 м. Угол подкоса  $45^\circ$ .

В рамках численного эксперимента рама загружалась снеговой нагрузкой величиной  $245 \text{ кг/м}^2$  при шаге рам 6 м. Таким образом, в численных исследованиях вес покрытия, ветровая нагрузка и собственный вес элементов рамы не учитывался.

При статическом расчете, использовалась плоская трехшарнирная стержневая конечно-элементная модель. Эпюры продольных усилий (рис. 3) и изгибающих моментов (рис. 4) позволяют определить расчетное сечение, которым является сечение стойки в месте стыка «стойка-подкос». Вопрос принятия типов узловых соединений подкоса прорабатывался с помощью наиболее простых, с конструкторской точки зрения, решений. В связи с этим, узел стыка подкоса и ригеля в расчетной схеме принят шарнирным, а узел стыка подкоса и стойки – жестким.



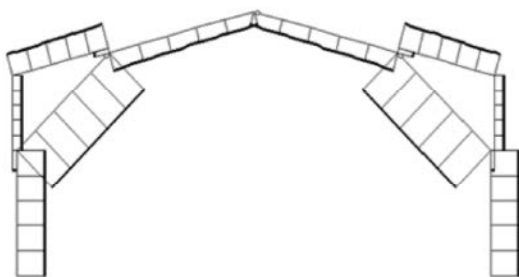


Рис. 3. Эпюра продольных усилий

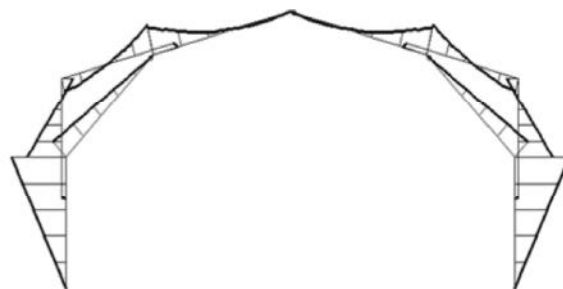


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов

Силовые элементы являются сжато-изгибаемыми по характеру работы, поэтому более рациональным является двутавровое сечение. По критерию прочности, согласно СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции», был подобран двутавровый профиль 45 Б1, являющийся исходным. Дальнейшая методика получения двутавров переменной жесткости описана в [6].

Расщепление карнизного узла выполнено путем продольного реза стойки. Таким образом, верхняя часть стойки, а также подкос образованы тавровым сечением. Стоит отметить, что при реальном конструировании получение подкоса путем отгиба представляется довольно трудным, ввиду сложности устройства поперечного реза стенки двутавра. В связи с этим, более рациональным будет полный вырез подкоса, где стык со стойкой будет выполнен жестким, при помощи дополнительно привариваемых ребер жесткости (рис. 5).

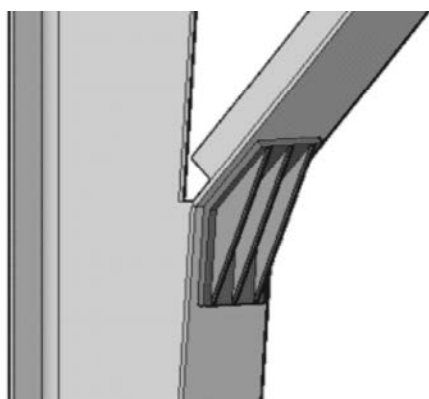


Рис. 1. Узел стыка «подкос-стойка»

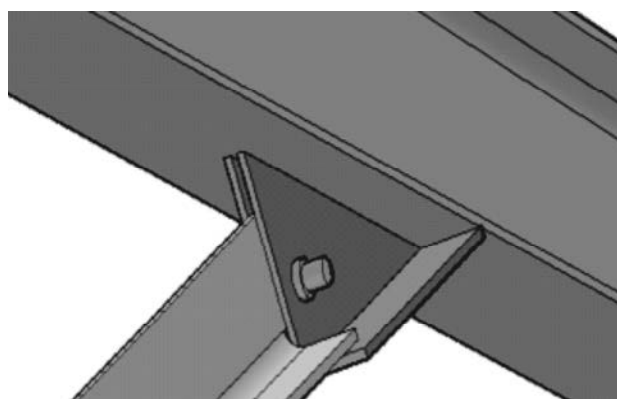


Рис. 6. Узел стыка «подкос-ригель»

Стык подкоса и ригеля выполнен шарнирным, и образован путем болтового соединения через Т-образный, дополнительно вводимый, элемент на сварке (рис. 6). По схеме работы стык является шарнирным, где полка тавра в подкосе вырезается. Было учтено также и конструктивное требование по соблюдению краевых расстояний от болта до края элемента.

Устройство конькового соединения принято фланцевым. Подкос рамы представляет собой два стыкуемых элемента через сварные накладки по стенке и поясу тавра (рис. 7). Такое устройство подкоса позволяет минимизировать количество отходов металла, и снижает массу используемого материала на конструкцию в целом.

Карнизный узел (рис. 8) выполнен с помощью приварки ребра тавра стойки к полке ригеля. В торце ригеля устраиваются торцевые пластины. При рассмотрении общей трудоемкости возведения рамы, очевидно, что возведение на строительной площадке будет происходить легче за счет того, что укрупнительную сборку ригеля и стойки возможно производить на земле, то есть отсутствуют сложности при выверке фланца стойки и фланца ригеля при монтаже ригеля на весу, как это устраивается в некоторых типах современных рамных конструкций.

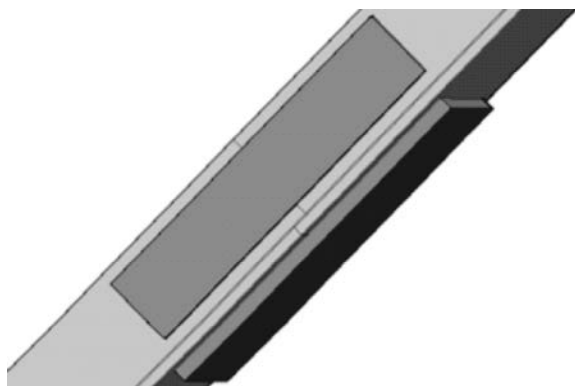


Рис. 7. Узел стыка «подкос-подкос»

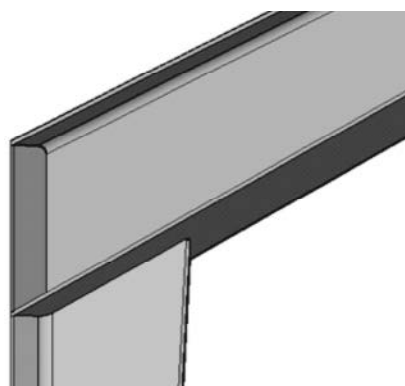


Рис. 8. Карнизный узел

Исследование напряженно-деформированного состояния численной модели производилось в ПК «Ansys». Задача решалась с учетом упругопластической работы стали рамы (рис. 9). Материал – сталь С245. Болты высокопрочные класса 10.9.

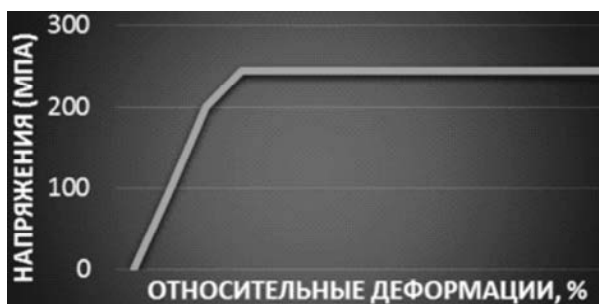


Рис. 9. Диаграмма работы стали силовых элементов рамы в нелинейной постановке

Методика загрузки аналогична загрузению конечно-элементной модели, и производилось только на снеговую нагрузку. Для исключения влияния дополнительных перемещений, вызванных податливостью бетона фундамента и деформациями основания, условия закрепления рамы не включали фундамент и основание. Изополя эквивалентных напряжений по раме представлены на рис. 10.



Рис. 10. Изополя эквивалентных напряжений

Можно заметить, что самым опасным местом конструкции будет являться узел стыка подкоса и стойки, вследствие влияния продольной силы подкоса. При более детальном рассмотрении узла (рис. 11) становится ясно, что элемент работает за пределами упругой стадии.

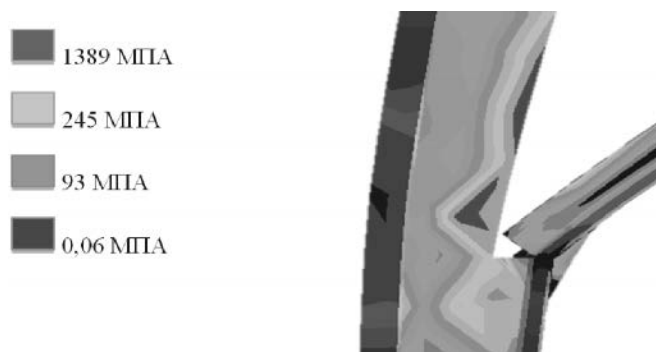


Рис. 11. Изополя эквивалентных напряжений узла стыка «подкос – стойка»

Возникает вопрос об исключении перенапряжения данного узла. Одним из самых эффективных методов, для исключения пластических деформаций, будет являться развитие сечения до такой формы, которая будет наилучшим образом воспринимать изгибающий момент и продольную силу. Очевидно, что лучшим сечением для сжато-изгибной работы будет являться двутавровое. Такое сечение удастся получить путем приварки дополнительных пластин достаточной толщины к стенке тавра в зоне критических напряжений (рис. 12). При этом нужно учитывать, что таким образом произойдет увеличение массы конструкции, а также незначительно увеличится трудоемкость изготовления за счет операций по подготовке контактирующих поверхностей.



Рис. 12. Узел стыка «подкос-стойка» после приведения сечения к двутавровому

После моделирования конструкции с развитым узлом стыка подкоса и стойки, картина эквивалентных напряжений меняется, и становится видно, что теперь узел находится на границе упругой работы материала с очень малой зоной пластики (рис. 13).

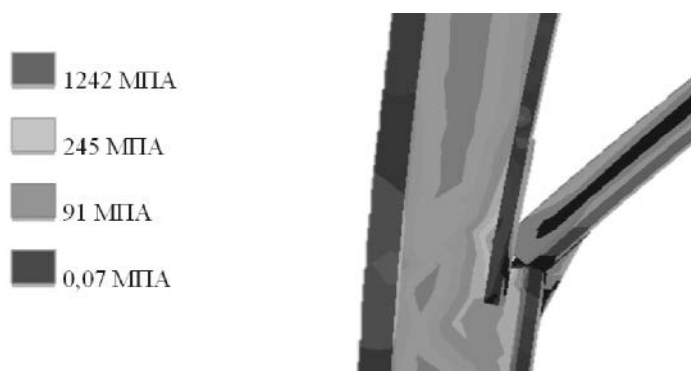


Рис. 13. Изополя эквивалентных напряжений узла стыка «подкос-стойка» при приведении к двутавровому сечению

В узле стыка ригеля и подкоса критические напряжения наблюдаются лишь на границе контакта «болт-конструкция» (рис. 14). Силовые элементы рамы работают в упругой стадии. В рамках данного численного исследования не производилось подробное представление особенностей геометрии болта, так как учет работы болта не являлся темой исследования. Дополнительные мероприятия по модификации узла не требуются.

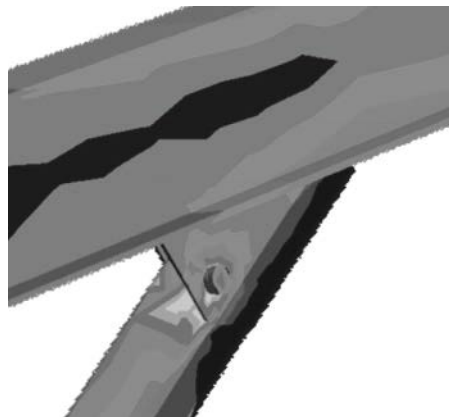


Рис. 14. Эквивалентные напряжения узла стыка «подкос-ригель»

Деформация рамы вследствие пониженной жесткости является довольно существенной. Максимальные горизонтальные перемещения (рис. 15) составили 35,7 мм вследствие влияния продольной силы и пониженной жесткости верхней части стойки. Вертикальные перемещения в коньке составили 87,2 мм (рис. 16).



Рис. 15. Горизонтальные перемещения элементов рамы по оси X



Рис. 16.3 Вертикальные перемещения элементов рамы по оси Z

После конструирования узловых соединений и проработки чертежных схем стадии КМД исследуемой рамы, удалось вычислить расход металла на исследуемую раму в целом, вес силовых элементов, вес используемого металла на дополнительно привариваемые детали (исключая метизы), а также общий вес рамы (табл. 1). Расход подсчитывался для исследуемой трехшарнирной рамы пролетом 18 м с шагом 6 м, и нагрузке к ней величиной  $245 \text{ кг/м}^2$ .

Таблица 1

**Расход металла на исследуемую раму**

Наименование	Значение
Удельный расход металла	18 кг/м <sup>2</sup>
Вес силовых элементов	1802 кг
Вес деталей (исключая метизы)	150 кг
Общий вес рамы	1952 кг

Путем анализа некоторых наиболее широко применяемых типов серийных рам промышленных зданий бескранового типа, к примеру, решетчатых двухшарнирных рам типа «Уникон 1» и «Уникон 2», удалось выяснить их теоретическую массу при аналогичных геометрических параметрах и условиях нагружений. Для сравнения исследуемой трехшарнирной рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла с данными типами рам, был введен удельный показатель веса «с», показывающий отношение удельного расхода металла к нагрузке на ригель (табл. 2). Чем данный коэффициент ниже, тем рама более экономична. Нужно отметить, что приведенные для сравнения значения общего веса рам типа «Уникон 1» и «Уникон 2» были подсчитаны для двухшарнирных рам, которые являются более экономичными по металлоемкости, нежели трехшарнирные, однако исследуемая рама указывает на более эффективный расход металла.

Таблица 2

**Расход металла исследуемой рамы переменного сечения с расщеплением карнизного узла в сравнении с решетчатыми рамами типа «Уникон»**

Наименование	Рама с расщеплением карнизного узла	Уникон 1	Уникон 2
Общий вес рамы (кг)	1952	2326	2154
Удельный показатель веса «с»	0,73	0,89	0,83

Очевидно, что данная конструктивная форма может использоваться в тех промышленных зданиях, в которых не используются краны, ввиду устройства подкоса. Однако, в просвете карнизного узла возможно протягивать инженерные системы, что положительно скажется на использовании рабочего пространства.

Рассматривая раму с позиции трудоемкости, можно сделать вывод о большем удобстве возведения конструкции на строительной площадке, ввиду возможности устройства укрупнительной сборки на земле в горизонтальном положении, нежели монтаж на весу у других типов рам. Чрезмерные деформации под нагрузкой являются одним из вопросов дальнейших исследований.

**Список библиографических ссылок**

1. Стальная рама с расщеплением карнизного узла : пат. 2263190 Рос. Федерация. № 204111210/03 ; заявл. 05.04.2004; опубл. 27.10.2005, Бюл. № 22.
2. Вахтель Р. Р., Исаев А. В., Ефимов О. И., Закиров Р. А. К расчету рамы с расщеплением сечения в уровне карнизного узла // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6.
3. Вахтель Р. Р., Исаев А. В., Закиров Р. А. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния стальных рам // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32) С. 137–148.
4. Sklyarov I. O. Application of monosymmetrical I-beams in light metal frames with variable stiffness // Праці Одеського політехнічного університету. 2016. № 1 (48) С. 30–34.
5. Вахтель Р. Р., Исаев А. В. Определение оптимальных параметров стальных рам : сб. ст. XIII Международной научно-практической конференции – Эффективные строительные конструкции: Теория и практика / ПГУАС. Пенза, 2013. С. 22–25.
6. Горев В. В. Курс металлических конструкций. Том 2: конструкции зданий. М. : Высшая школа, 2004. 528 с.
7. Дарков А. В. Строительная механика. Изд. 7. М. : Высшая школа, 1976. 600 с.
8. Уманский А. А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Изд. 2. М. : Стройиздат, 1972. 600 с.
9. Architectural design guide. Lightweight steel framing // bmp-group.com : интернет-изд. 2012. URL: <http://www.bmp-group.com/docs/Design/lightweight-steel-framing-architectural-design-guide.pdf> (дата обращения: 27.10.2017).

10. Кузнецов И. Л., Салахутдинов М. А. Оптимизация параметров нового конструктивного решения стального каркаса многопролетного здания // Известия КГАСУ. 2012. № 2 (20). С. 94–98.

**Isaev A.V.** – candidate in technical sciences, associate professor

E-mail: [Isaev@kgasu.ru](mailto:Isaev@kgasu.ru)

**Vahtel R.R.** – senior lecturer

E-mail: [v\\_roman@kgasu.ru](mailto:v_roman@kgasu.ru)

**Zakirov R.A.** – post-graduate student

E-mail: [ramilzakirov1991@gmail.com](mailto:ramilzakirov1991@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Numerical study of stress-strain state of frame with variable section and eave node splitting

#### Abstract

*Problem statement.* The aim of the research is the development of a new, more economical metal consumption, the structural form of frame frames for industrial buildings made of lightweight metal structures (LMC), as well as the study of its behavior under load and the definition of the field of application.

*Results.* The main results of the study are to study the effect of splitting of the cornice knot on the stress-strain state of the force elements of the frame. Also, the article presents options for constructive study of nodal connections, and presents the results, which are the basis for further study and improvement of the investigated frame.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the construction industry consists in the novelty of the structural form of the frame structure of industrial buildings, which is more economical by the criterion of metal consumption in comparison with some typical frames of industrial buildings. Also, the development of the nomenclature of standard LMC will increase the competitiveness of domestic factories and producers, in comparison with foreign ones.

**Keywords:** frame of variable section, eave node splitting, analysis, static solving, numerical experiments.

#### References

1. Steel frame with splitting of the cornice unit: pat. 2263190 Rus. Federation. No. 204111210/03; claimed. 05.04.2004; publ. 27.10.2005, Bul. № 22.
2. Vahtel R. R., Isaev A. V., Efimov O. I., Zakirov R. A. About designing of the frame with splitting of cross-section in the eaves node // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. № 6.
3. Vahtel R. R., Isaev A. V., Zakirov R. A. Experimental studies of a stress-strain of the steel frame // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 2 (32). P. 137–148.
4. Sklyarov I. O. Application of monosymmetrical I-beams in light metal frames with variable stiffness // *Praci Odeskogo politihnichnogo universitetu*. 2016. № 1 (48). P. 30–34.
5. Vakhtel R. R., Isaev A. V. Determination of the optimal parameters of steel frames: Coll. of art. of the XIII International scientific and practical conference – Effective Building Constructions: Theory and practice / PGUAS. Penza, 2013. P. 22-25.
6. Gorev V. V. Course of steel construction. Part 2. M. : Vysshaya shkola, 2004. 528 p.
7. Umanskiy A. A. Reference book of industrial, dwelling, public building engineer. № 2 revised. M. : Strojizdat, 1972. 600 p.
8. Darkova A. V. Structural mechanics publication. № 7. Workbook for universities. M., Vysshaya shkola, 1976.
9. Architectural design guide. Lightweight steel framing // [bmp-group.com](http://bmp-group.com) : интернет-изд. 2012. URL: <http://www.bmp-group.com/docs/Design/lightweight-steel-framing-architectural-design-guide.pdf> (reference date: 27.10.2017).
10. Kuznetsov I. L., Salakhutdinov M. A. Optimization of the parameters of a new structural solution of steel frame of multispan building // *Izvestiya KGASU*. 2012. № 2 (20). P. 94–98.

УДК 539.3

**Каюмов Р.А.** – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Мухамедова И.З.** – кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: [muhamedova-inzilija@mail.ru](mailto:muhamedova-inzilija@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Красильников В.О.** – инженер-проектировщик

E-mail: [vespeer@mail.ru](mailto:vespeer@mail.ru)

**ООО «Эстель»**

Адрес организации: 420101, г. Казань, ул. Хусаина Мавлютова, д. 44

**Тазюков Б.Ф.** – кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: [bulat.tazioukov@kpfu.ru](mailto:bulat.tazioukov@kpfu.ru)

**Казанский федеральный университет**

Адрес организации: 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

### **Разработка методики расчета элементов конструкции многоэтажного жилого здания на долговечность\***

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Разработка численной методики расчета многоэтажной железобетонной конструкции на долговечность.

*Результаты.* Разработана методика определения ресурса многоэтажного железобетонного жилого здания при воздействии статических и динамических нагрузок, определены сроки службы конструкции. Построена конечно-элементная модель многоэтажного жилого здания с учетом изменения класса бетона и варьирования ветровой пульсационной нагрузки. Проведены численные эксперименты на длительную прочность.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что долговечность многоэтажного железобетонного жилого здания возрастает при увеличении класса бетона. Также долговечность растет при уменьшении количества этажей многоэтажного железобетонного жилого здания. При увеличении пульсаций ветровой нагрузки долговечность здания падает.

**Ключевые слова:** методика, модель, долговечность, железобетонное здание, длительная прочность, численный эксперимент.

#### **Введение**

В настоящее время для расчета остаточного ресурса конструкций и прогноза времени их безаварийной эксплуатации применяются преимущественно методы, основанные на экспертных оценках, которые направлены на оценку вероятности возникновения аварийной ситуации и возможных ее последствий. Эти методы, как правило, носят качественный характер. Их применение дает неопределенную гарантию достоверности. Они позволяют определить только один показатель: либо вероятность отказа, либо прогнозируемое время дальнейшей эксплуатации.

Известны также количественные методы оценки ресурса строительных объектов, в основу которых положено применение вероятностных моделей и методов теории надежности. Методы расчета конструкций на надежность основаны на вероятностно-статистическом подходе. Основные аспекты и проблемы анализа надежности подробно рассмотрены в работах Майера М., Стрелецкого Н.С., Половко А.М., Болотина В.В., Острейковского В.А., Райзера В.Д., Ржаницына А.Р. Стрелецкий Н.С. первый провел анализ влияния срока службы на коэффициент запаса несущей способности эксплуатируемых конструкций. Ржаницын А.Р. разработал инженерный метод расчета строительных конструкций с применением теории надежности. Количественные методы являются достаточно сложными для инженерных приложений.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-06018).

Анализ обзора исследований показал, что задача оценки остаточного ресурса зданий и сооружений в настоящее время недостаточно разработана. Однако, в связи с массовой выработкой нормативного срока службы промышленных предприятий чрезвычайно актуальной является разработка инженерных методов оценки остаточного ресурса, позволяющие получить на основе имеющейся небольшой статистической информации объективную оценку времени возможной дальнейшей эксплуатации конструкций с заданным уровнем надежности (риска).

В данной работе разработана численная методика по определению закона изменения остаточного ресурса и методика по прогнозированию срока службы конструкций железобетонного здания. Предложен метод вычисления долговечности железобетонной конструкции по расчетным значениям, приведенным в СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Расчет проводился с применением программного комплекса «ЛИРА САПР 2014».

### Расчетная модель

Построим каркас многоэтажного железобетонного жилого здания. Зададим жесткость материалов элементов конструкции (колонны и плиты перекрытия) согласно СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Для численных экспериментов рассмотрим самый нагруженный элемент в конструкции. Зададим статические и циклические нагрузки, согласно СП 20.13330.2011. В свою очередь, чтобы узнать нагрузки на элементы, используем таблицу РСУ (расчетные сочетания усилий) и получим исходные данные при сочетании нагрузок, которые воздействуют на элементы здания. Нами рассмотрены различные сочетания нагрузок: статическая ( $P^{стат}$ ) статическая и ветровая ( $P^{стат+ветр}$ ), ветровая и пульсационная ( $P^{ветр+пульс}$ ), суммарная статическая, ветровая и пульсационная ( $P^{общ}$ ).

Определим напряжения от статической нагрузки ( $\sigma^{стат}$ ), от статической и ветровой нагрузки ( $\sigma^{стат+ветр}$ ), от ветровой и пульсационной ( $\sigma^{ветр+пульс}$ ), и от общей ( $\sigma^{общ}$ ). Построим зависимость напряжений от количества циклов воздействия нагрузок  $n$ , как показано на рис. 1.

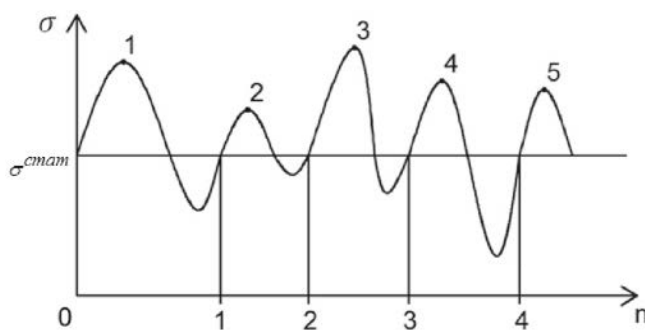


Рис. 1. Зависимость напряжений от количества циклов нагружения

Определив напряжения, можем найти сумму изменяемой части напряжений по формуле:

$$\sigma^{ветр+пульс} = \sigma^{общ} - \sigma^{стат}. \quad (1)$$

Далее, расчет проводим с учетом изменения пульсации ветровой нагрузки. Для этого введен некоторый коэффициент  $k$ , с помощью которого можно записать следующее выражение для напряжений:

$$\sigma^{общ} = \sigma^{стат} + \sigma^{ветр+пульс}/k. \quad (2)$$

Кривую Велера аппроксимируем по следующей формуле:

$$\sigma_{проч} = \sigma_0 / e^{\rho_m \beta \cdot (n-1)}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  — предел прочности бетона,  $\beta$  — механическая характеристика материала,  $\rho_m$  — коэффициент, который определяется по соотношению:

$$r_m = S_m^{общ} / S_m^{стат}. \quad (4)$$

Далее в численных расчетах было принято, что  $\beta = 10^{-6}$ . Кривая Велера, соответствующая выражению (3), изображена на рис. 2. Используя максимальное



напряжение ( $\sigma^{общ}$ ), можно определить количество циклов ( $n_m^*$ ), которое выдержит интересующий нас элемент.

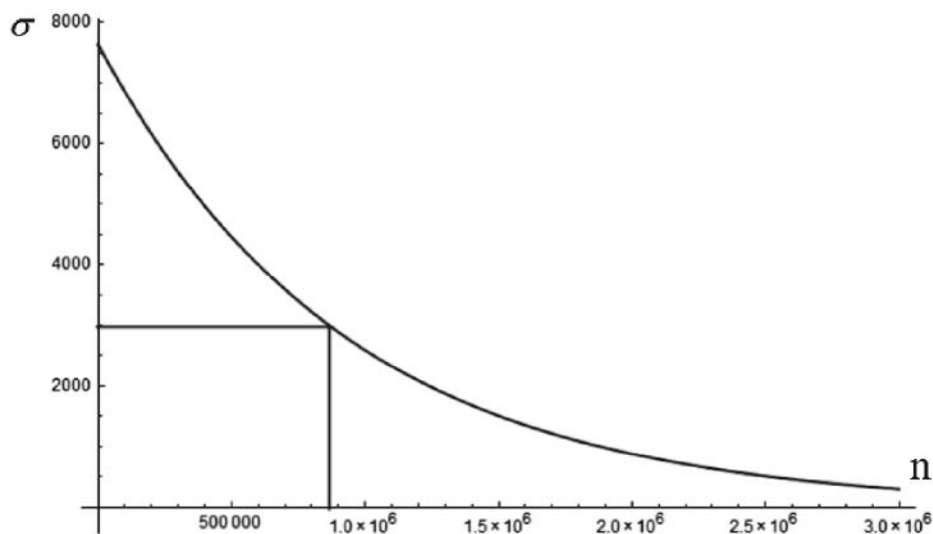


Рис. 2. Кривая Вёлера

Определив количество циклов  $n_m^*$ , рассмотрим задачу оценки долговечности здания. Найдем потерю ресурса за 1 год. Доля потери ресурса можно определить по следующему выражению:

$$\omega_m = N_m / n_m^* \quad (5)$$

где  $N_m$  – количество циклов нагружения в год.

Далее определяем общую долю потери ресурса здания:

$$w^{общ} = \sum_{i=1}^n w_m^i \quad (6)$$

Долговечность конструкции ( $t^*$ ) можно теперь вычислить по следующей формуле:

$$t^* = 1 / w^{общ} \quad (7)$$

Представленная методика определения долговечности здания предназначена для инженерных исследований и не требует применения обширной статистической информации.

По данной методике были проведены численные эксперименты для 6, 12 и 15 этажных зданий с применением классов бетона В40, В50, В60, В70.

Рассмотрим, например, здание 2-ух секционное 12-этажное, из которых 12 типовых жилых этажей, и технический этаж, имеет размеры в осях 48×23 м. Имеются 2 лифта, лифтовой холл, незадымляемая лестница.

Сборный железобетонный каркас сформирован из несущей системы «УИКСС». Поперечная и продольная жесткость здания обеспечивается ядром жесткости, установкой диафрагм, а также созданием жесткого диска перекрытия.

Колонны сборные – железобетонные. Сечение колонн – 500×500 мм. Вертикальные стыки выполнены по типу штепсельного соединения арматуры в скважинах или отверстиях на полимерном растворе. Соединения сборных железобетонных плит перекрытий – надколонных, пролетных и межколонных – выполнены по типу штепсельного соединения.

Поперечные стержни ставят без расчета, но с соблюдением требований норм. Расстояние между ними (по условию обеспечения закрепления продольных стержней от бокового выпучивания при сжатии) должно быть при вязаных каркасах не более 15d и не более 500 мм. Диаметр хомутов в вязаных каркасах должен быть не менее 5 мм и не менее 0,25d, где d-наибольший диаметр продольных стержней. Толщина защитного слоя поперечных стержней должен быть не менее 15 мм.

Ветровые нагрузки воспринимаются ядром жесткости и диафрагмами жесткости, толщина которых составляет 200 мм. В качестве ограждающих конструкций

используется кладка из газобетонных блоков класса D600 толщиной 250 мм с вентилируемым фасадом.

Плиты перекрытия в системе принимаются железобетонными толщиной 160 мм. Межколонная плита выполнена с выпусками рабочей арматуры для соединения с пролетной плитой и скважинами для соединения с надколонной плитой. Плиты армируются сетками из арматуры класса А400. Пролетные моменты воспринимаются нижней рабочей арматурой, а опорные моменты – верхней рабочей арматурой. Защитный слой до рабочей арматуры принимается не менее 15 мм и не менее диаметра рабочей арматуры.

Район строительства – II, расчётное значение снеговой нагрузки (временной нагрузки на покрытие) по СП 20.13330.2011 составляет 240 кг/м<sup>2</sup>. Система «каркас-фундамент-основание», состоящая из упругих элементов оболочки (плиты и диафрагмы жесткости) и стержней (колонны), с различными контурными условиями. Горизонтальные смещения фундамента приняты равными нулю. В расчетной модели отражены геометрические характеристики и материалы элементов каркаса (колонны, диафрагмы жесткости, плита перекрытия), условия сопряжения отдельных элементов друг с другом, нагрузки. Для обеспечения высокой точности расчета шаг триангуляции пластинчатых конечных элементов принят 0,4 м. Так же для формирования расчетной схемы и модели в пространстве использовался программный комплекс «САПФИР-2013».

На рис. 3 представлены графики зависимости долговечности  $t^*$  для 6, 12 и 15 этажных зданий от класса бетона В40, В50, В60, В70. В численных экспериментах рассмотрена самая нагруженная колонна с сечением 500х500мм.

В результате расчетов были построены следующие регрессионные функции:

- Для 6-ти этажного здания  $t^* = -10,9x^3 + 92,42x^2 - 191,51x + 322,76$ ;
- Для 12-ти этажного здания  $t^* = -3,7775x^2 + 52,438x + 22,778$ ;
- Для 15-ти этажного здания  $t^* = -2,9775x^2 + 46,342x - 29,532$ .

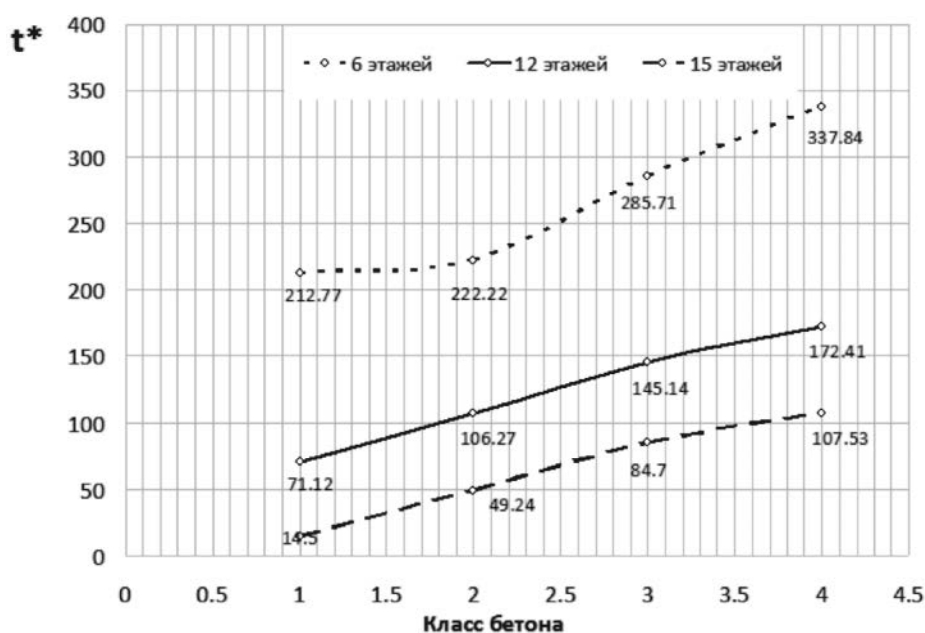


Рис. 3. Диаграмма зависимости долговечности здания от класса бетона

Построим зависимости долговечности здания от изменения ветровой пульсационной нагрузки. Для того, чтобы определить зависимость долговечности здания или элемента от изменения ветровой пульсационной нагрузки, рассмотрим жилое здания с разным количеством этажей (6, 12, 15) и будем варьировать нагрузку  $\pm 30\%$ . Жилое здание такое же, нагрузки те же. Рассчитываем самую нагруженную колонну с сечением 500×500 мм. Применяется класс бетона В70. результаты расчетов приведены на рис. 4.

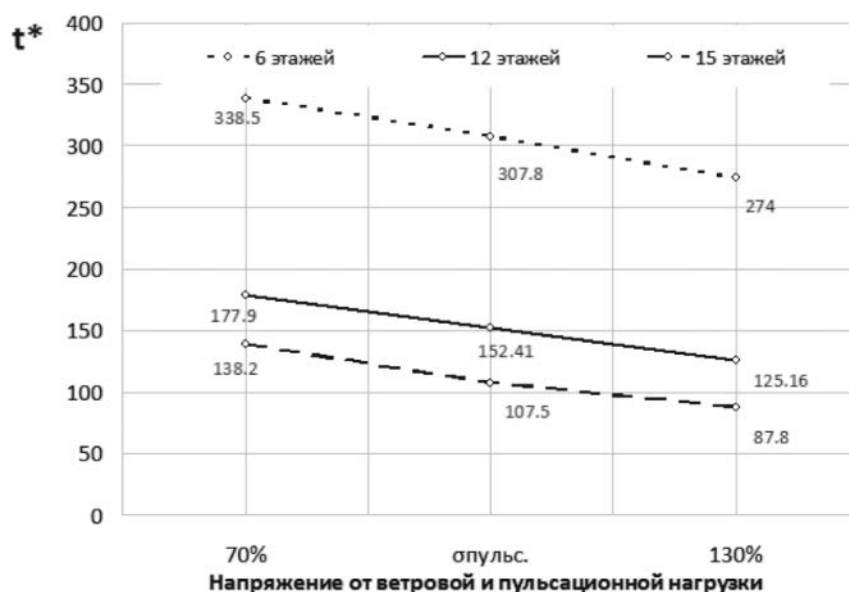


Рис. 4. Диаграмма зависимости долговечности здания от варьирования напряжения ветровой и пульсационной нагрузки

### Заключение

1. Разработана методика оценки срока службы конструкции типа многоэтажного железобетонного жилого здания.
2. Построена конечно-элементная модель многоэтажного жилого здания с учетом изменения класса бетона и варьирования ветровой пульсационной нагрузки.
3. Проведены численные эксперименты на длительную прочность железобетонных зданий в зависимости от класса бетона и варьирования ветровой пульсационной нагрузки.
4. Построены регрессионные функции по определению долговечности в зависимости от класса бетона и варьирования ветровой пульсационной нагрузки.

### Выводы

1. Долговечность многоэтажного железобетонного жилого здания возрастает при увеличении класса бетона.
2. Долговечность растет при уменьшении количества этажей многоэтажного железобетонного жилого здания.
3. Долговечность железобетонного здания падает при увеличении пульсаций ветровой нагрузки.

### Список библиографических ссылок

1. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : АН СССР, 1977. С. 86–93.
2. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Muhamedova I. Z. Nonlinear problems of stability cylindrical panels with imperfection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158. P. 01025.
3. Ерышев В. А., Латышева Е. В., Малыш А. С. Определение эксплуатационных параметров качества железобетонных конструкций в составе здания без их физического разрушения путем натурных испытаний // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (31). С. 75–79.
4. Каюмов Р. А., Мухамедова И. З., Туйсина Е. Б. Расчет балки с трещиной, находящейся под действием неравномерной циклической нагрузки // Известия вузов. Авиационная техника, КНИТУ. 2016. № 4. С. 13–19.
5. Симаков В. Д., Никитин Г. П. Компьютерное моделирование оголовка железобетонной колонны в ПК «ANSYS». Казань : КГАСУ, 2015. 27 с.

6. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete // Cement and concrete composites. 2010. № 9. P. 731–739.
7. Куприянов В. Н., Альтапов С. Р. Моделирование ветровых воздействий изменением формы здания // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 100–104.
8. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. М. : МГСУ, 2010. 198 с.
9. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. М. : Стройиздат, 1972. 110 с.
10. Верюжский Ю. В., Колчунов В. И. Методы механики железобетона. Курск : НАУ, 2005. 653 с.

**Kayumov R.A.** – doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Muhamedova I.Z.** – candidate of physical and mathematical sciences

E-mail: [muhamedova-inzilija@mail.ru](mailto:muhamedova-inzilija@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya, st., 1

**Krasilnikov V.O.** – design engineer

E-mail: [vespeer@mail.ru](mailto:vespeer@mail.ru)

**LTD «Estel»**

The organization address: 420101, Russia, Kazan, Khusain Mavlyutov st.,44

**Tazyukov B.F.** – candidate of physical and mathematical sciences

E-mail: [bulat.tazioukov@kpfu.ru](mailto:bulat.tazioukov@kpfu.ru)

**Kazan Federal University**

The organization address: 420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya st., 18

### **Development of the design procedure for structural elements of multi-storey residential building for durability**

#### **Abstract**

*Problem statement.* Development of a numerical methodology for calculating a multi-storey reinforced concrete structure for durability.

*Results.* A technique for determining the resource of a multi-storey reinforced concrete residential building under the influence of static and dynamic loads has been developed, and the service life of the structure has been determined. A finite-element model of a multi-storey residential building has been constructed, taking into account changes in the class of concrete and variation of the wind pulsation load. Numerical experiments were carried out for long-term strength.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the durability of a multi-storey reinforced concrete residential building increases with increasing class of concrete. Also, longevity grows with a reduction in the number of floors of a multi-storey reinforced concrete residential building. When the ripple of the wind load increases, the durability of the building falls.

**Keywords:** technique, model, durability, reinforced concrete building, long-term strength, numerical experiment.

#### **References**

1. Bolotin V. V. Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures. M. : AN SSSR, 1977. P. 86–93.
2. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Muhamedova I. Z. Nonlinear problems of stability cylindrical panels with imperfection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 158. P. 01025.
3. Erishev V. A., Latisheva E. V., Malish A. S. Determination of the operational parameters of the quality of reinforced concrete structures in the structure of the building without their physical destruction by full-scale tests // Izvestiya KGASU. 2015. № 1 (31). P. 75–79.

4. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Tuisina E. B. Calculation of a beam with a crack under the influence of an uneven cyclic load // *Izvestija vusov. Aviacionnaja tehnika, KNITU*. 2016. № 4. P. 13–19.
5. Simakov V. D., Nikitin G. P. Computer modeling of the head of the reinforced concrete column in the PC «ANSYS». Kazan : KGASU, 2015. 27 p.
6. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete // *Cement and concrete composites*. 2010. № 9. P. 731–739.
7. Kupryanov V. N., Altapov S. R. Modeling of wind influences by changing the shape of a building // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 2 (36). P. 100–104.
8. Dubinskiy S. I. Numerical simulation of wind effects on high-rise buildings and complexes. M. : MGSU, 2010. 198 p.
9. Savickiy G. A. Wind load on structures. M. : Stroyisdat, 1972. 110 p.
10. Veryushskiy Y. V., Kolchunov V. I. Methods of mechanics of reinforced concrete. Kursk : NAU, 2005. 653 p.

УДК 539.5

**Каюмов Р.А.** – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Шакирзянов Ф.Р.** – кандидат физико-математических наук

E-mail: [faritbox@mail.ru](mailto:faritbox@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Ахметзянов Р.И.** – инженер

E-mail: [Nrustem@bk.ru](mailto:Nrustem@bk.ru)

**ООО «Татгражданпроект»**

Адрес организации: 420140, Россия, г. Казань, ул. Ю. Фучика, д. 98А

### **Моделирование процесса деформирования и оценка долговечности армированной балки**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Рассматривается задача об изгибе армированной балки под поперечной нагрузкой. Считается, что полная деформация состоит из упругой части и деформации ползучести. Упругая часть связана с напряжениями законом Гука. Исследуются варианты связи напряжений и деформаций ползучести в виде законов течения и упрочнения. Для оценки долговечности балки вводится параметр поврежденности Работнова, связанный с напряжениями дифференциальным соотношением. Деформация волокон по высоте балки при изгибе принимается линейной согласно гипотезе Бернулли. Для замыкания системы добавляются уравнения равновесия в виде связи в сечении напряжений с нормальной силой и изгибающим моментом. Рассматриваемая система уравнений решается методом конечных разностей по времени. По продольной координате на каждом шаге по времени получается алгебраическое уравнение относительно кривизны балки.

*Результаты.* Определяется зависимость распределения напряжений по высоте сечения балки для различных значений времени. Долговечность определяется из условия достижения параметром поврежденности значения единицы. Решение задачи проводится для различных вариантов механических характеристик. Результаты представлены в виде графиков.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что данная методика расчета позволяет оценивать долговечность армированной балки.

**Ключевые слова:** метод конечных разностей, долговечность, ползучесть, закон упрочнения, напряжения, деформации.

#### **Введение**

«СП 63.13330.2012. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003» требует проводить дополнительный расчет по II-й группе предельных состояний – на долговечность. Однако принципы этого расчета, указанные в документе, являются крайне приближенными, а точные методы еще не разработаны. Это связано с малой степенью изученности законов изменения со временем прочностных и жесткостных характеристик бетона, трудностью учета влияния на них состава бетона, влажности воздуха и агрессивных сред. Но при исследовании долговечности одним из главных факторов является ползучесть бетона. Данное исследование показывает, что это свойство существенно сказывается не только на прочностных и жесткостных характеристиках возводимых конструкций, но и на их долговечности.

#### **Основные соотношения**

Рассматривается центрально нагруженная шарнирно опертая армированная балка с рабочей арматурой в растянутой зоне. Моделируется процесс деформирования бруса под поперечной нагрузкой (рис. 1).

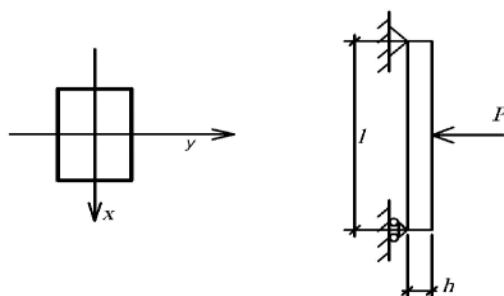


Рис. 1. Схема балки

Принимается гипотеза плоских сечений, а для материала используется модель, в котором кроме свойств упругости учитывается и деформации ползучести и процесс накопления повреждений. Для деформации ползучести используется определяющие соотношения (физический закон) в дифференциальной форме, а именно – закон течения с учетом упрочнения. Для параметра поврежденности принимается эволюционное уравнение Работнова также в дифференциальной форме. Так как задача статически определима, можно рассматривать поведение не всей балки, а только опасного нормального сечения в середине пролета, нагруженного изгибающим моментом внутренней пары сил.

По причине ползучести бетона при нагружении рассматриваемой балки с течением времени меняется ее кривизна, а из-за наличия арматуры смещается положение нейтральной линии. Это значит, что задача является нелинейной, соответственно и решена она может быть только численным методом. Здесь используется метод конечных разностей.

Для реализации этого метода был использован язык программирования *Visual Basic* из пакета *Microsoft Visual Studio*, так как в этом варианте легко реализуется дискретный метод расчета, и имеются средства создания графики.

В качестве закона деформирования бетона использовался закон Гука. В случае армирования стеклопластиковой арматурой закон деформирования арматуры также принимался линейным, в случае стальной арматуры использовалась диаграмма Прандтля, учитывающая упруго-пластическую работу арматуры.

В качестве дифференциального уравнения для необратимой части деформаций выбран закон ползучести с учетом упрочнения в виде:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{s^n}{h^n (1 + c \cdot |\varepsilon_{cr}|)^m}, \quad (1)$$

где  $n$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты,  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $\varepsilon_{cr}$  – необратимая часть деформаций,  $c$  – коэффициент упрочнения, учитывающий снижение скорости прироста деформаций ползучести с течением времени.

Чтобы оценить степень поврежденности материала, связанную с накоплением в бетоне микротрещин, используется дифференциальное уравнение для параметра поврежденности Работнова:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{Bs}{1-\omega}, \quad (2)$$

где  $B$  – параметр материала, показывающий влияние нормального напряжения на скорость накопления повреждений,  $\omega$  – параметр поврежденности материала. Значение  $\omega=0$  соответствует состоянию материала перед началом загрузки, при  $\omega=1$  происходит разрушение материала.

Приведем основные соотношения, использовавшиеся для моделирования изучаемого процесса.

Полная деформация принималась состоящей из упругой и необратимой части:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr}. \quad (3)$$

Закон упругости принимался линейным:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{el}. \quad (4)$$

Уравнение равновесия в виде равенства нулю суммы проекций элементарных сил на ось  $x$  имеет вид (здесь и далее буквой  $A_s$  обозначается площадь поперечного сечения арматуры, буквой  $A$  – площадь поперечного сечения балки за вычетом  $A_s$ ):

$$\sum N = \sum_{i=1}^n s_i^b \Delta A + s^s A_s = 0. \quad (5)$$

Уравнение равновесия в виде равенства изгибающего момента сумме моментов элементарных сил записывается в виде:

$$\sum M = \sum_{i=1}^n s_i^b \Delta A \cdot r_i = M_x. \quad (6)$$

Выражение для приращения необратимых деформаций в конечных разностях записывается в следующей форме:

$$\Delta e_{cr} = \frac{s^n}{h^n (1 + c(e_{cr}))^m} \Delta t. \quad (7)$$

Для деформаций принималась гипотеза Бернулли, т.е. считалось, что по высоте сечения полная деформация распределена по линейному закону:

$$\varepsilon = \kappa \cdot y. \quad (8)$$

Здесь  $\kappa$  – кривизна продольной оси балки.

### Расчет на долговечность при переменной нагрузке

В процессе эксплуатации на конструкцию может воздействовать не только постоянные нагрузки, но и нагрузки, которые изменяются во времени (снеговые, ветровые, температурные воздействия). В работе примем, что эти нагрузки можно аппроксимировать кусочно-постоянной функцией (рис. 2).

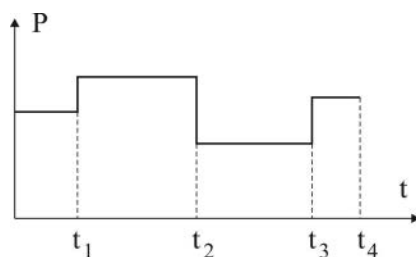


Рис. 2.

Для оценки долговечности конструкции необходимо на каждом из промежутков времени определить параметр повреждения  $\omega$ , для этого нужно проинтегрировать соотношение (2):

$$\int_{t_i}^t (1 - w) dw + C_i = \int_{t_i}^t B S(t) dt, \quad (i = \overline{1, N}). \quad (9)$$

Здесь  $\sigma(t)$  – кусочно-постоянная нагрузка, а  $C_i$  – константы интегрирования.

При расчете конструкции на долговечность необходимо, чтобы величина  $\omega$  была одной и той же на границе временных отрезков. Это приводит к сложным расчетам, поэтому в работе предложена упрощенная методика вычислений. Будем считать, что для каждого значения нагрузки можно найти  $t_i^*$ , при котором  $\omega=1$ , т.е. материал разрушается. При этом напряжения в сечении балки будем считать распределенными в виде прямоугольников (как в предельном состоянии). Данный подход можно использовать для оценки долговечности сверху. Это предположение о распределении напряжений в виде прямоугольников подтверждается анализом проведенных численных экспериментов (рис. 3).

Тогда соотношение (2) легко проинтегрируется. Согласно теории линейного суммирования повреждений найдем общую поврежденность конструкции:

$$\Omega = \frac{\Delta t_1}{t_1^*} + \frac{\Delta t_2}{t_2^*} + \dots \quad (10)$$

Условием разрушения является, как и выше, достижение величиной  $\Omega$  значения единица.



Для сравнительного анализа упомянутых выше двух подходов, рассмотрим следующую задачу. Пусть до значения времени  $t_1$  напряжение постоянно и равно  $S_1$ . После этого происходит повышение напряжения до  $S_2$ . Поставим задачу определения величин  $\omega$ ,  $\Omega$ , накопленных к концу времени  $t=t_2$ . Согласно первому подходу, нужно проинтегрировать уравнение (2) для каждого из участков времени нагружения. Тогда получим:

$$w - \frac{w^2}{2} = BS_1 t + C_1, \quad (11)$$

Из условия, что  $\omega=0$  при  $t=0$  получим  $C_1=1/2$ . При  $t \leq t_1$  находим  $\omega_1$

$$\omega_1 = 1 - \sqrt{1 - 2BS_1 t_1}. \quad (12)$$

На втором участке по времени ( $t_1 < t < t_2$ ) решение уравнения (2) имеет такой же вид

$$w - \frac{w^2}{2} = BS_2 t + C_2. \quad (13)$$

Из условия,  $\omega = \omega_1$  при  $t=t_1$  находим  $C_2$ .

$$C_2 = \frac{(1 - \omega_1)^2}{2} + BS_2 t_1. \quad (14)$$

Теперь можно найти значение  $\omega_2$  в момент времени  $t=t_2$ :

$$w = \omega_2 = 1 - \sqrt{C_2 - 2BS_2 t_2}. \quad (15)$$

Теперь найдем  $\Omega$ . Согласно второму подходу, для первого напряжения найдем долговечность  $t_1^*$  из условия  $\omega = 1$ . Для этого используем общее решение (11):

$$t_1^* = \frac{1}{2BS_1}. \quad (16)$$

Аналогично для второго напряжения найдем долговечность  $t_2^*$  из условия  $\omega = 1$ .

$$t_2^* = \frac{1}{2BS_2}. \quad (17)$$

После этого найдем  $\Omega$  из (10).

### Численные эксперименты по определению напряженно-деформированного состояния

На основе соотношений (1)-(8) были разработаны численная методика и программа расчета напряжений. В численных экспериментах принимались следующие значения характеристик:

$$n=1,4; \eta=10000 \text{ МПа} \cdot \text{сут}^{1/n}; m=1, B=0,00005 \text{ (МПа} \cdot \text{сут)}^{-1}.$$

Программа позволяет наблюдать изменение эпюры нормальных напряжений, кривизны балки под силой и параметра поврежденности с течением времени. После завершения работы программа выдает следующие числовые результаты:

Долговечность – время от начала нагружения до момента, до которого возможна эксплуатация конструкции. Это или время, при котором происходит разрушение, т.е. время при котором параметр  $\omega$  достигает значения единицы. Или это время, при котором значения прогиба балки или ширины раскрытия трещин станут равными предельно допустимым. Будем считать, что расчет на ширину раскрытия трещин согласно СП 63.13330.2012 можно проводить для бетона и в стадии ползучести и накопления повреждений. Согласно СП 63.13330.2012 ширина раскрытия трещин должна определяться по формуле:

$$a_{cr} = j_1 j_2 j_3 \gamma_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s,$$

где  $\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s$  – произведение поправочных коэффициентов,  $\sigma_s$  – напряжение в арматуре,  $E_s$  – модуль упругости арматуры,  $l_s$  – расстояние между трещинами.

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s,$$

где  $A_{bt}$  – площадь бетона растянутой зоны, определяемая из эпюры,  $d_s$  – диаметр арматуры.

Кроме этого программа выдает эпюры нормальных напряжений в различные моменты времени. На рис. 2 приведен один из вариантов эпюр, полученных при  $c=0$ . Аналогичные картины получаются и для случая использования теории ползучести с упрочнением.

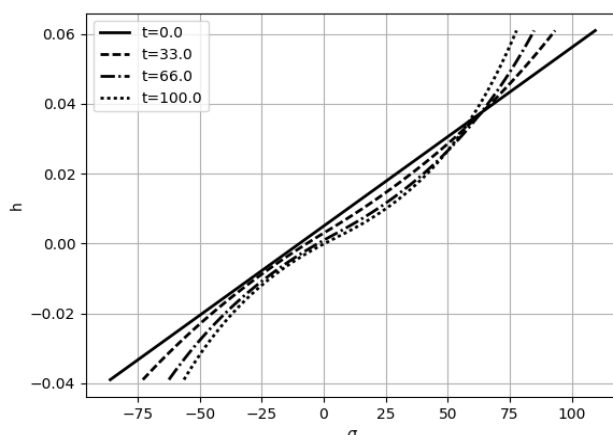


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений по сечению в различные моменты времени

Анализ результатов показал следующее. С течением времени значения нормальных напряжений в сжатой зоне бетона уменьшаются, а в арматуре – увеличиваются. Значит, железобетонные конструкции длительного срока службы должны быть переармированы.

Поскольку бетон разгружается с течением времени, а скорость накопления повреждений пропорциональна напряжению (это видно из уравнения Работнова), то реальные железобетонные конструкции оказываются долговечнее, чем те, что проектируются по результатам расчета на прочность без учета ползучести. Это можно видеть на графиках зависимости долговечности балки от изгибающего момента в опасном сечении (рис. 3).

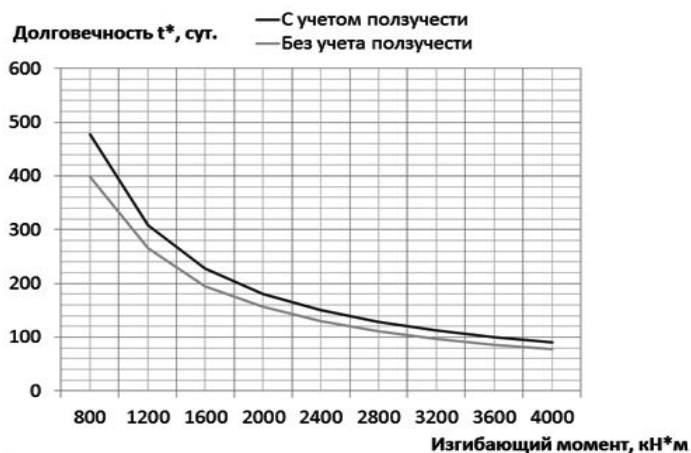


Рис. 3. Зависимость долговечности балки от изгибающего момента в сечении

Однако, ползучесть ведет к увеличению кривизны во всех точках. Вследствие этого возрастает прогиб в пролете. Поэтому долговечность балки может оказаться существенно меньше того значения, которое получают при проектировании по результатам расчета на жесткость без учета ползучести. Таким образом, чтобы не допустить наступление предельных состояний II-й группы рационально применять рабочую сжатую арматуру. Это означает, что необходимо в дальнейшем разработать методику определения не только напряжений, но и функции прогибов.

Графики, приведенные на рис. 3-4, построены для балки с гипотетическими механическими и геометрическими характеристиками и параметрами ползучести. Это связано с тем, что эксперименты для выявления количественных характеристик ползучести не проводятся в достаточном объеме. Выполнение подобных опытов крайне затруднительно, т.к. велико время исследования, причем все это время температура и влажность среды должны поддерживаться на неизменном уровне. При этом необходимо

определить, как влияют на характеристики ползучести зерновой состав, водоцементное отношение, первичные условия схватывания бетонной смеси. Возможно, что с появлением новых требований к проектированию железобетонных конструкций подобные эксперименты будут проведены.

В связи с вышеизложенным, по результатам численных экспериментов можно сделать качественные выводы только в относительных величинах. Во-первых, оказалось, что влияние вязкости на долговечность имеет обратный, близкий к экспоненциальной зависимости, характер. Во-вторых, выявлена следующая особенность в зависимости максимального напряжения в бетоне от времени. В первом приближении график зависимости состоит из двух прямых (рис. 4), причем, момент достижения арматурой предела текучести, после которого напряжения в ней уже не могут возрастать, никак не отражается на характере графика. Значит, аппроксимировав данную зависимость, можно охарактеризовать ее лишь 4 величинами: двумя угловыми коэффициентами прямых и координатами точки излома.

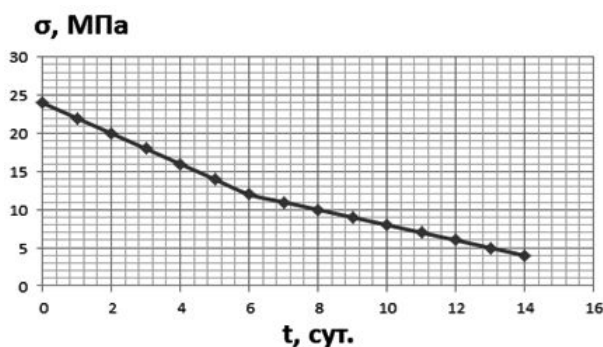


Рис. 4. Зависимость от времени максимальных нормальных напряжений в бетоне

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-06018, № 16-38-00736 и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 1660 государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/58 за 2016.

### Список библиографических ссылок

1. Рахимов З. Р., Алтыкис М. Г. Долговечность строительных материалов. Казань : КГАСУ, 2005. 118 с.
2. Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z., Tuisina E. B. Analysis of a beam with a crack under irregular cyclic load // Russian Aeronautics. 2016. Т. 59. № 4. С. 452–459.
3. Степанова В. Ф. Долговечность бетона. М. : Ассоциация строительных вузов, 2014. 126 с.
4. Каюмов Р. А., Сулейманов А. М., Мухамедова И. З. Моделирование поведения пленочно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005, Т. 11, № 4. С. 519–530.
5. Каюмов Р. А., Шарафутдинова А. А. Об оценке долговечности строительных конструкций из стеклопластика // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 114–123.
6. Delsaute B., Torrenti J.-M., Staquet S. Modeling basic creep of concrete since setting time // In cement and concrete composites. 2017. Vol. 83. P. 239–250.
7. Каюмов Р. А., Шакирзянов Ф. Р. Моделирование поведения стержней в упругой среде с учетом влияния эффекта Пуассона в одномерных элементах // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 21. С. 139–143.
8. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // IOP Conference Series:

- Materials Science and Engineering. 11 Сер. «11<sup>th</sup> International Conference on «Mesh Methods for Boundary-Value Problems and Applications»». 2016.
9. Каюмов Р. А., Мухамедова И. З., Хамматова В. В. Методика определения коэффициента постели в задаче потери устойчивости среднего слоя трехслойного стержня при растяжении // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 23. С. 118–120.
  10. Каюмов Р. А., Шакирзянов Ф. Р., Бутенко А. В. Приближенный метод вычисления деформаций ползучести по наследственной теории и сравнение ее с инкрементальной теорией // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 179–185.

**Kayumov R.A.** – doctor of physical-mathematical sciences, professor

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Shakirzyanov F.R.** – candidate of physical-mathematical sciences

E-mail: [faritbox@mail.ru](mailto:faritbox@mail.ru)

**Kazan state university of architecture and engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Ahmetzyanov R.I.** – engineer

E-mail: [Nrustem@bk.ru](mailto:Nrustem@bk.ru)

**LTD «Tatgrazhdanproekt»**

The organization address: 420140, Russia, Kazan, Y. Fuchika st., 98A

## Modeling of the process of deformation and evaluation of the life of a reinforced beam

### Abstract

*Problem statement.* The problem of the bending of a reinforced beam under transverse loading is considered. It is believed that the total deformation consists of an elastic part and a creep deformation. The elastic part is connected with the stresses by Hooke's law. The variants of the connection of stresses and deformations of creep in the form of the laws of flow and hardening are investigated. To estimate the life of the beam, the parameter of Rabotnov's damage, connected with the stresses by a differential relation, is introduced. The deformation of the fibers along the height of the beam during bending is assumed linear according to the Bernoulli hypothesis. For the closure of the system, equilibrium equations are added in the form of a connection in the section of stresses with normal force and a bending moment. The system of equations under consideration is solved by the method of finite time differences. On the longitudinal coordinate at each time step we obtain an algebraic equation with respect to the curvature of the beam.

*Results.* The dependence of the distribution of stresses on the height of the beam section for different values of time is determined. Durability is determined from the condition that the parameter of damage is a unit value. The solution of the problem is carried out for various variants of mechanical characteristics. The results are presented in the form of graphs.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is that this calculation technique makes it possible to evaluate the durability of the reinforced beam.

**Keywords:** finite difference method, durability, creep, hardening law, stress, deformation.

### References

1. Rakhimov Z. R., Altykis M. G. Durability of building materials. Kazan : KSUAE, 2005. 118 p.
2. Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z., Tuisina E. B. Analysis of a beam with a crack under irregular cyclic load // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59. №. 4. P. 452–459.
3. Stepanova V. F. Durability of concrete: A textbook for high schools. M. : Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 2014. 126 p.

4. Kayumov R. A., Suleimanov A. M., Mukhamedova I. Z. Modeling the behavior of film-fabric material under the influence of operational factors // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy*. 2005, T.11, № 4. P. 519–530.
5. Kayumov R. A., Sharafutdinova A. A. On the evaluation of the durability of building structures from fiberglass plastics // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 2 (40). P. 114–123.
6. Delsaute B., Torrenti J.-M., Staquet S. Modeling basic creep of concrete since setting time // *In cement and concrete composites*. 2017. Vol. 83. P. 239–250.
7. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R. The simulation of the behavior of rods in an elastic medium with allowance for the influence of the Poisson effect in one-dimensional elements // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2016. T. 19. № 21. P. 139–143.
8. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11*. Сер. «11<sup>th</sup> International Conference on «Mesh Methods for Boundary-Value Problems and Applications»». 2016.
9. Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z., Hammatova V. V. The method of determining the bed coefficient in the problem of loss of stability of the middle layer of a three-layer rod under tension // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016. T. 19. №. 23. P. 118–120.
10. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R., Butenko A. V. An approximate method for calculating creep strains by hereditary theory and comparing it with incremental theory // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 179–185.

УДК 624.012

**Мирсаяпов Ил.Т.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru)

**Фаттахова А.И.** – студент

E-mail: [fattakhova.alsou@yandex.ru](mailto:fattakhova.alsou@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Технико-экономическая оценка влияния повышения  
прочности и выносливости бетона за счет применения высокопрочного бетона  
на расход материалов в железобетонных каркасах по серии 1.020-1/83**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы является выявление влияния повышения прочности и выносливости бетона при применении высокопрочного бетона на расход стальной арматуры, а также оценка возможности сокращения объема бетона за счет уменьшения размеров поперечного сечения основных конструктивных элементов железобетонного каркаса по серии 1.020-83/1.

*Результаты.* Выполнено сравнение материалоемкости основных конструктивных элементов железобетонного каркаса по серии 1.020-83/1 при использовании обычных и высокопрочных бетонов. Были произведены расчеты по 1 ой и 2ой группам предельных состояний, как при стандартных размерах типовых элементов, так и при уменьшении размеров сечения до минимально возможных.

*Выводы.* Применение высокопрочного бетона В100 вместо В20 и В30 в основных конструктивных элементах железобетонного каркаса по серии 1.020-83/1 приводит к сокращению расхода стали до 2-х раз, уменьшает раскрытие трещин до 2-х раз, а в некоторых элементах и вовсе устраняет возможность образования трещин, а также дает возможность уменьшения размеров поперечного сечения колонн и ригелей, таким образом сокращать и объем бетона на изготовление основных конструктивных элементов каркаса.

**Ключевые слова:** высокопрочный бетон, расход арматуры, каркас по серии 1.020-83/1, колонны, ригели.

В настоящее время бетон является основным конструкционным материалом в строительстве. При этом применение высокопрочного бетона в силу своих положительных качеств является наиболее привлекательным. Согласно ГОСТ 25192-2012 [1] к высокопрочным бетонам могут быть отнесены бетоны с классом по прочности при сжатии В55 и более. Высокопрочный бетон получается за счет оптимизации состава и свойств исходных материалов и применения различных добавок [1-10].

Высокопрочный бетон имеет более высокую плотность, водо- и газопроницаемость, высокую морозостойкость, высокую долговечность, повышенную стойкость к химически активным веществам, повышенную коррозионную защиту арматуры и более высокую износостойкость. Такой бетон имеет высокую прочность и выносливость на сжатие и растяжение (табл. 1). Улучшается совместная работа арматуры и бетона, потому что прочность и выносливость анкеровки арматуры растет прямо пропорционально классу (кубиковой прочности) бетона.

Поэтому в современных условиях, характеризующихся все возрастающим объемом применения железобетона и необходимостью рационального расходования ресурсов применение высокопрочных бетонов для изготовления основных несущих конструкций является весьма эффективным. В результате увеличивается несущая способность строительных конструкций, уменьшаются размеры сечений конструкций, сокращается расход бетона и арматуры, уменьшается собственный вес конструкций, а также уменьшаются габариты опалубок несущих конструкций и в целом себестоимость строительства [11-13].

Таблица 1

## Выносливость бетона

Вид сопротивления	Классы бетона			
	B20	B30	B60	B100
Осевое сжатие, $R_b$ , МПа	11,5	17	33	86,5
Выносливость бетона на осевое сжатие, $R_b$ , МПа, при $\rho=0,3$	7,1	10,4	20,2	53,1
Осевое растяжение, $R_{bt}$ , МПа	0,9	1,15	1,8	7,8
Выносливость бетона на осевое растяжение, $R_{bt}$ , МПа, при $\rho=0,3$	0,6	0,7	1,1	4,8
Значения начального модуля упругости бетона при сжатии и растяжении $E_b \cdot 10^3$ , МПа	27,5	32,5	39,5	41

При этом мелкозернистые высокопрочные бетоны, так называемые песчаные бетоны, по сравнению с крупнозернистыми щебеночными бетонами обладают дополнительными преимуществами. Мелкозернистый (песчаный) бетон имеет более высокий предел прочности на растяжение, прочность сцепления арматуры с песчаным бетоном выше, чем у обычного бетона той же прочности, относительный предел выносливости мелкозернистого бетона на 20 % выше, чем у обычного бетона той же прочности. Это объясняется более однородной структурой и более высокой пластичностью мелкозернистого бетона [11]. Эти дополнительные преимущества высокопрочного песчаного бетона весьма привлекательны для условий Республики Татарстан, потому что дорогостоящий щебень в республику завозится из других регионов России. Применение высокопрочных бетонов при изготовлении железобетонных конструкций дает также значительное сокращение расхода дорогостоящей стальной арматуры, которая также завозится извне.

Указанные выше положительные качества высокопрочного бетона позволяют использовать его в экстремальных и неблагоприятных климатических условиях, сокращая расход на обслуживание и ремонт зданий и сооружений. Применение высококачественных высокопрочных бетонов наиболее рационально при строительстве высотных зданий и сооружений, атомных электростанций, гидротехнических сооружений, промышленных зданий, крупнопролётных мостов, различных инженерных сооружений, покрытия дорог и т.д.

Внедрение высокопрочных бетонов в строительстве позволяет существенно сократить расходы арматурной стали в железобетонных конструкциях уменьшить габариты конструкции, а, соответственно, и объем бетона. Уменьшение размеров сечения дает возможность изготавливать конструкции под разные нагрузки в формах одного типоразмера, что ведет к сокращению типоразмеров форм. Для того, чтобы показать на конкретном примере экономическую эффективность применения высокопрочных бетонов в строительстве был рассмотрен универсальный межвидовый железобетонный каркас многоэтажных зданий по серии 1-020, который широко применяется в гражданском, промышленном и сельскохозяйственном строительстве, выполненный по типовой серии с применением бетонов B20 и B30, а также – с применением высокопрочного бетона B100. Техничко-экономические показатели составлены на каждый элемент каркаса и на один температурный блок таких зданий. Рассматривался один температурный блок размерами 15×60 м. Сетка колонн (6+3+6)×6 м. При этом рассматривались 2 типа зданий: 1) 5-этажное; 2) 9-этажное. Расчетная полезная нагрузка на перекрытия – 150 кг/м<sup>2</sup>, снеговая – 240 кг/м<sup>2</sup>, собственный вес конструкций учитывался согласно данным серийного альбома. Согласно типу здания и его этажности были определены сечения:

Для 5-ти этажного здания: колонны 300×300 мм высотой 2,8 и 3,3 м, ригели высотой 450 мм, плиты пустотные 1,5×6 м.

Для 9-ти этажного здания: колонны сечением 400×400 мм, 300×300 мм высотой 2,8 и 3,3 м, ригели высотой 450 мм, плиты пустотные 1,5×6 м.

Производился расчет по 1 и 2 группам предельных состояний по нормальным и наклонным сечениям к продольной оси. Диаметр арматуры и классы бетона B20 и B30 определялись в одном случае согласно серии, а в другом – при использовании

высокопрочных бетонов (класс В100). Стоит отметить, что расчет армирования пустотных плит проводился без учета предварительного напряжения, то есть при классе арматуры А400. Данное сравнение приводится для определения необходимости предварительного напряжения при использовании высокопрочных бетонов.

Результаты расчетов сведены в табл. 2-6.

Таблица 2

**Характеристики колонн по серийному альбому для обычного бетона В30**

Вид здания	Высота колонн, м	Размеры сечения	Гибкость	Эксцентриситет, мм	Диаметр (мм) рабочей арматуры А400	Расход материалов на элемент		
						бетон, м <sup>3</sup>	сталь, кг	вес, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-этажное здание	2,8	300×300	0,107	10	по расчету 22	0,252	36,13	0,66
	3,3	300×300	0,091	10	по расчету 22	0,297	42,10	0,78
9-этажное здание	2,8	400×400	0,133	13,33	по расчету 28	0,448	56,81	1,18
	3,3	400×400	0,121	13,33	по расчету 28	0,528	66,65	1,39
	2,8	300×300	0,107	10	по расчету 22	0,252	36,13	0,66
	3,3	300×200	0,091	10	по расчету 22	0,297	42,10	0,78

Таблица 3

**Характеристики колонн для высокопрочного бетона В100**

Вид здания	Высота колонн, м	Размеры сечения	Гибкость	Эксцентриситет, мм	Диаметр (мм) рабочей арматуры А400	Расход материалов на элемент		
						бетон, м <sup>3</sup>	сталь, кг	вес, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-ти этажное здание	2,8	300×300	0,107	10	не требуется, конструктивно 16	0,252	20,38	0,65
	3,3	300×300	0,091	10	не требуется, конструктивно 16	0,297	23,53	0,76
	2,8	200×200	0,112	20,38	0,3	0,112	20,38	0,3
	3,3	200×200	0,132	23,53	0,35	0,132	23,53	0,35
9-ти этажное здание	2,8	400×400	0,133	13,33	не требуется, конструктивно 16	0,448	20,38	1,14
	3,3	400×400	0,121	13,33	не требуется, конструктивно 16	0,528	23,53	1,34
	2,8	300×300	0,107	10	не требуется, конструктивно 16	0,252	20,38	0,65
	3,3	300×200	0,091	10	не требуется, конструктивно 16	0,297	23,53	0,76
	2,8	200×200	0,112	20,38	0,3	0,112	20,38	0,3
	3,3	200×200	0,132	23,53	0,35	0,132	23,53	0,35

Таблица 4

**Характеристики ригеля по серийному альбому для обычного бетона В30**

Вид здания	Высота сечения	Диаметры вид рабочей арматуры по сечениям к продольной оси		прогиб	ширина раскрытия трещин	Расход материалов на элемент		
		нормальным	наклонным			бетон, м <sup>3</sup>	сталь, кг	вес, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-ти этажное здание	450	A400 3Ø22	A240 Ø8	0,82	0,252	1,02	25,16	2,75
9-ти этажное здание	450	A400 3Ø25	A240 Ø8	1,252	0,252	1,02	29,12	2,58



Таблица 5

**Характеристики ригеля для высокопрочного бетона В100**

Вид здания	Высота сечения	Диаметры вид рабочей арматуры по сечениям к продольной оси		прогиб	ширина раскрытия трещин	Расход материалов на элемент		
		нормальны м	наклонным			бетон, м <sup>3</sup>	сталь, кг	вес, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-ти этажное здание	450	A400 3Ø12	B500 Ø3	0,01	0,00	1,02	18,43	2,57
	350	A400 3Ø12	B500 Ø3	0,02	0,00	0,954	18,43	2,40
9-ти этажное здание	450	A400 3Ø12	B500 Ø3	0,01	0,252	1,02	18,43	2,57
	350	A400 3Ø12	B500 Ø3	0,05	0,00	0,954	18,43	2,40

Таблица 6

**Характеристики плит перекрытия и покрытия при использовании бетона согласно серии и при использовании высокопрочных бетонов**

Класс бетона	Диаметры вид рабочей арматуры по сечениям к продольной оси		прогиб	ширина раскрытия трещин	Расход материалов на элемент		
	нормальным	наклонным			бетон, м <sup>3</sup>	сталь, кг	вес, т
1	2	3	4	5	6	7	8
V30	A400 8Ø14	A240 Ø8	18,43	0,105	1,016	63,902	2,604
V100	A400 8Ø8	не требуется, конструктивно B500 Ø3	10,29	0,094	1,016	36,101	2,576

Как показывают расчеты, элементы, армированные по серии, имеют большой расход арматуры, то есть усилия воспринимаются и бетоном, и арматурой. По расчету, при V100, прочность и жесткость конструктивных элементов, а также трещиностойкость обеспечивается бетоном. При использовании высокопрочного бетона необходимость в арматуре уменьшается или вовсе отпадает, т.е. большая часть армирования назначается конструктивно. Указанные в таблицах диаметры арматуры для высокопрочного бетона назначены согласно конструктивным требованиям СП 63.13330-2012. Для высокопрочных бетонов, очевидно, следует пересмотреть также рекомендуемые диаметры конструктивного армирования в сторону уменьшения.

В колонне при увеличении прочности бетона процент армирования уменьшается в среднем на 14 %. В качестве эксперимента были уменьшены также сечения в пятиэтажном здании до 200×200 мм, а в 9-ти этажной – до 300×300 мм и 200×200 мм. Сечение 200×200 мм является минимально допустимым согласно СП 63.13330-2012. Уменьшение размеров колонн приводит к увеличению их гибкости. Были проведены расчеты на устойчивость. А также определены случайные эксцентриситеты. Устойчивость обеспечивается несмотря на более высокую гибкость. Эти расчеты производились для определения возможности применения данного сечения колонн. Согласно расчетам данные сечения могут быть использованы при проектировании. Особенно эффективным является применение колонн сечения 200×200 мм даже в 9-ти этажных зданиях, где согласно нормам минимальное сечение составляет 400×400 мм. Это приводит к существенной экономии бетона на изготовление колонн.

В ригеле также наблюдается положительный эффект от использования высокопрочного бетона. В 5-ти этажных зданиях арматура не требуется по расчету. В 9-этажных зданиях – арматура также ставится конструктивно, так как меньшие диаметры обеспечивают необходимую несущую способность. Был выполнен расчет по II гр. п.с. Расчетный прогиб в изгибаемых элементах уменьшился на 68 %, а ширина раскрытия трещин уменьшилась, а в некоторых случаях она не образуется за увеличения сопротивления высокопрочного бетона растяжению.

Таблица 7

## Расход бетона и стали на один температурный блок

Вид здания	Класс бетона	Бетон, м <sup>3</sup>	Сталь, кг	Экономия		Экономия тыс. руб
				Бетон, м <sup>3</sup>	Сталь, кг	
1	2	3	4	5	6	7
5-этажное здание	B30	1507,59	14023,5	59,37	5024,77	319,04
	B100	1448,22	8998,73			
9-этажное здание	B30	2805,14	35944,2	198,35	19746,49	1176,86
	B100	2606,79	16197,71			

В табл. 7 приводятся технико-экономические показатели для одного температурного блока здания в целом. При расчете использовались данные для бетона B30 по типовой серии 1.020 для колонн высотой 3,3 м и сечением 300 мм для 5-ти этажного здания, 400 мм – для 9-ти. Для высокопрочных бетонов принималось сечение 200мм. В ригелях также рассматривалось уменьшенное сечение при использовании высокопрочных бетонов. Небольшое уменьшение веса каждого элемента приводит к значительному уменьшению затрат материалов. Ярче всего данный эффект заметен на примере колонн, где вес уменьшился в среднем на 49 %.

**Вывод**

Использование высокопрочного бетона дает реальный экономический эффект, так как сокращается расход бетона и арматуры, уменьшается вес элементов каркаса; уменьшение веса изделий уменьшает транспортные расходы, позволяет применять краны меньшей грузоподъемности, а, следовательно, уменьшаются и трудозатраты по монтажу железобетонных конструкций.

**Список библиографических ссылок**

1. Морозова Н. Н., Хамза Абдулмаек Кайс. Получение высокопрочного мелкозернистого бетона с использованием природного цеолита // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 185–193.
2. Хамза Абдулмаек Кайс, Морозова Н. Н. Высокопрочный мелкозернистый бетон с использованием цеолита синайского полуострова Египта : Сб. тезисов международной научно-технической конференции «Высокопрочные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016)» / КГАСУ. Казань, 2016. С. 85.
3. Inozemcev A. S., Korolev E. V. A method for the reduction of deformation of high-strength lightweight concrete // Advances in Cement Research. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 92–98.
4. Inozemcev A. S., Korolev E. V., Smirnov V. A. Nanoscale modifier as an adhesive for hollow microspheres to increase the strength of high-strength lightweight concrete // Structural Concrete. 2017. Vol. 18, Iss. 1. P. 67–74.
5. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete. Microstructure, Properties and Materials. New York : McGraw-Hill, 2006. 683 p.
6. Sarkar V. I., Baalbaki M. The influence of the type of cement on the properties and microstructure of high performance concrete // Proceedings of 9<sup>th</sup> ICCS. 1993. Vol. 5. P. 89–941.
7. Older I. Special inorganic cements. London-New York : E & FN Spon, 2000. 390 p.
8. Kato H., Katumero R., Ushiyama H. Properties of the high-strength concrete using belite-rich cement silica fume // Semento Konkurito Ronbunshu. 1997. № 51. P. 364–369.
9. Karepetyan K. A. Problems of durability and theory of concrete. Erevan : Gitutyun publishing house of the NAS RA, 2012. 256 p.
10. Kline Sami A. Aggregates, elastic modulus and Poissons ratio of concrete // J. Amer. Coner. Inst. 1986. № 6. P. 961–965.

11. Мирсаяпов Ил. Т., Тамразян А. Г. Основы повышения эффективности применения высокопрочных бетонов в конструкциях промышленных зданий при действии поперечных сил // Бюллетень строительной техники. 2017. № 1. С. 52–57.
12. Mirsayapov Il. T. Detection of Stress Concentration Regions in Cyclic Loading by the Heat Monitoring Method // Mechanics of Solids. 2010. Vol. 45. № 1. P. 133–139.
13. Mirsayapov Il. T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // Strength of Materials. 2009. Vol. 41. № 3. P. 339–344.

**Mirsayapov Il.T.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru)

**Fattakhova A.I.** – student

E-mail: [fattakhova.alsou@yandex.ru](mailto:fattakhova.alsou@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Technical and economic assessment of the concrete's  
strength and endurance increasing effect due to the high-strength concrete  
using for the materials consumption in reinforced concrete frames  
according to the series 1.020-1/83**

**Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the work is to identify the effect of the concrete strength and endurance increasing in high-strength concrete using on the consumption of steel reinforcement, as well as assessing the possibility of reducing the concrete per set volume to reduce the reinforced concrete frame's main structural elements cross-sectional dimensions in the series 1.020-83/1.

*Results.* A comparison of the material intensity of the main structural elements of the reinforced concrete frame on the series 1.020-83/1 is made using conventional and high-strength concretes. The calculations were performed for the 1st and 2nd groups of limiting states, both for standard sizes of typical elements and for reducing the cross-sectional dimensions to the minimum possible.

*Conclusions.* The use of high-strength concrete B100 instead of B20 and B30 in the basic structural elements of the reinforced concrete frame on the series 1.020-83/1 reduces the consumption of steel 2 times, reduces the crack opening up to 2 times, and in some cases eliminates the possibility of cracks, and also makes it possible to reduce the dimensions of the cross-section of columns and crossbars, thus reducing the volume of concrete for making the basic structural elements of the frame.

**Keywords:** high-strength concrete, the expense of armature, a frame on a series 1.020-83/1, columns, crossbars.

**References**

1. Morozova N. N., Khamza Abdulmayek Kays. Production of high-strength fine-grained concrete using natural zeolite // Izvestiya KSUAE. 2016. № 2 (36). P. 185–193.
2. Khamza Abdulmayek Kais, Morozova N. N. High-strength fine-grained concrete with the use of the zeolite of the Sinai peninsula of Egypt : Theses of the international scientific and technical conference «High-strength concrete6 technologies, structures, economy (VBB-2016)» / KSUAE. Kazan, 2016. P. 85.
3. Inozemcev A. S., Korolev E. V. A method for the reduction of deformation of high-strength lightweight concrete // Advances in Cement Research. 2016. Vol. 28. Iss. 2. P. 92–98.

4. Inozemcev A. S., Korolev E. V., Smirnov V. A. Nanoscale modifier as an adhesive for hollow microspheres to increase the strength of high-strength lightweight concrete // *Structural Concrete*. 2017. Vol. 18, Iss. 1. P. 67–74.
5. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. *Concrete. Microstructure, Properties and Materials*. New York : McGraw-Hill, 2006. 683 p.
6. Sarkar V. I., Baalbaki M. The influence of the type of cement on the properties and microstructure of high performance concrete // *Proceedings of 9<sup>th</sup> ICCI*. 1993. Vol. 5. P. 89–941.
7. Older I. *Special inorganic cements*. London-New York : E & FN Spon, 2000. 390 p.
8. Kato H., Katumero R., Ushiyama H. Properties of the high-strength concrete using belite-rich cement silica fume // *Semento Konkurito Ronbunshu*. 1997. № 51. P. 364–369.
9. Karepetyan K. A. *Problems of durability and theory of concrete*. Erevan : Gitutyun publishing house of the NAS RA, 2012. 256 p.
10. Klinc Sami A. Aggregates, elastic modulus and Poissons ratio of concrete // *J. Amer. Coner. Inst.* 1986. № 6. P. 961–965.
11. Mirayapov Il. T., Tamrazyan A. G. The fundamentals of increasing the effectiveness of the use of high-strength concrete in the construction of industrial buildings under the action of transverse forces // *Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2017. № 1. P. 52–57.
12. Mirsayapov Il. T. Detection of Stress Concentration Regions in Cyclic Loading by the Heat Monitoring Method // *Mechanics of Solids*. 2010. Vol. 45. № 1. P. 133–139.
13. Mirsayapov Il. T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41. № 3. P. 339–344.

УДК 693;539.4

**Страхов Д.Е.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [strahov@kgasu.ru](mailto:strahov@kgasu.ru)

**Сахапова А.И.** – студент

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Применение объёмных конечных элементов в реконструируемых зданиях архитектурного наследия**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния, реконструируемого объекта архитектурного наследия, сложной конфигурации, со сводчатыми конструкциями. Задача решается с применением объёмных элементов в расчетной схеме здания.

*Результаты.* Определяется напряженно-деформированное состояние несущей системы, закономерности влияния повреждений на несущую способность и пригодность к дальнейшей эксплуатации, с рекомендациями для дальнейшего применения.

*Выводы.* Установлено, что основной причиной возникновения перенапряжений сводчатых перекрытия является отсутствие распора, от демонтированных и замененных на плоские перекрытия сводов, который должен компенсироваться распором от соседних сводов, а также не сохранившихся стальных затяжек.

**Ключевые слова:** объёмные конечные элементы, расчетные комплексы, расчетные модели, кирпичные своды, реконструкция.

Создание адекватной, информативной модели напряженно-деформированного состояния зданий сложной конфигурации, в том числе являющихся объектами архитектурного наследия, несущими культурно-историческую ценность, является необходимой мерой при проведении реконструкции.

В значительной части таких зданий присутствуют сводчатые конструкции, различных разновидностей. Зачастую данные конструкции находятся в ненадлежащем состоянии в основном из-за горизонтальных и вертикальных подвижек опор, возникших в результате просадок, разрушения опор или растеске дополнительных проемов под пятой свода [1]. Исследование распределения напряжений в телах таких конструкций, и конструкций всего здания, является на сегодняшний день достаточно актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи известны, как методы численного моделирования сводчатых конструкции различной конфигурации [2; 3], так и экспериментальное изучение механизмов разрушения кирпичных сводов [4; 5]. Однако, следует учесть, что при учете типов опорных закреплений, и наличия затяжек, в основном не учитываются жесткости опорных стен. Между тем, подвижки опор и опорные жесткости часто имеют большое влияние на поведение, как арок, так и сводов [6]. Следует отметить, что моделирование каменных сводов представляет собой достаточно сложную задачу [7], с необходимостью использования программных комплексов, способных моделировать сложные конструкции и криволинейные упругие элементы [8].

На примере Монастырского училища Свяжского Успенско-Богородицкого мужского монастыря произведен анализ распределения напряжений в несущих элементах здания. Определены закономерности влияния повреждений на несущую способность и пригодность к дальнейшей эксплуатации.

Здание Монастырского училища Свяжского Успенско-Богородицкого мужского монастыря двухэтажное. Построено на рубеже XII-XVIII вв., в период обновления и благоустройства основной обители, продолжавшийся с конца XVII и до середины XVIII вв. Здание расположено на западном прясле монастырской ограды, представляет собой прямоугольное в плане строение с выступами со стороны главного восточного фасада и изломом западного фасада, обусловленном направлением монастырской ограды. В 1957 г. северная часть здания была перестроена, сводчатые перекрытия в этой части здания были заменены плоскими. В остальных помещениях здания перекрытия сводчатые. Кровля вальмовая, четырехскатная. Конструктивная схема здания стеновая, с основными несущими наружными и внутренними продольными и поперечными кирпичными стенами. Наружные несущие и самонесущие стены выполнены толщиной 620-1200 мм. Фундаменты – ленточные, из бутового камня на известковом растворе.

Расчет здания был выполнен в программном комплексе ANSYS. Общий вид модели представлен на рис. 1. Расчетная модель включала в себя несущие стены, своды, бутовый фундамент, и несущее основание. Нагрузки приняты согласно нормативам строительства СП 20.13330.2016 «Свод Правил. Нагрузки и воздействия». Упругие характеристики кладки приняты как для гомогенной модели, с учетом [9]. Максимальные допустимые напряжения в кирпичной кладке приняты согласно СП 15.13330.2012 «Свод Правил. Каменные и армокаменные конструкции».

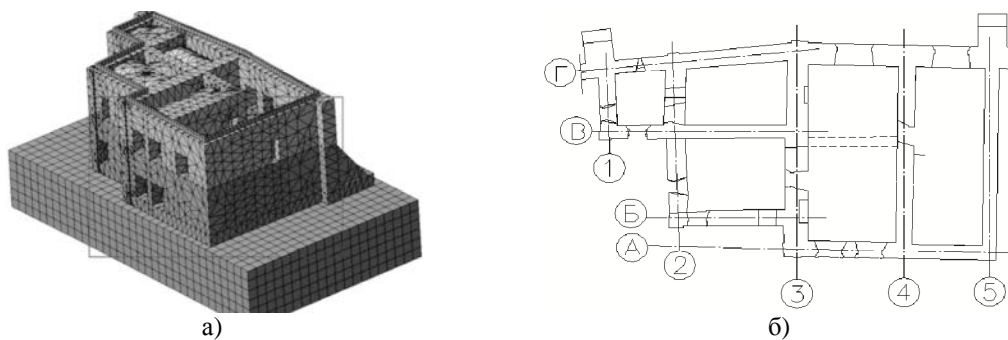


Рис. 1. Здание монастырского училища: а) расчетная схема; б) план

Результаты статического расчета с учетом упругого основания приведены на рис. 2-17. Напряжения в элементах приведены в МПа, ось X – вдоль длинной стороны здания.

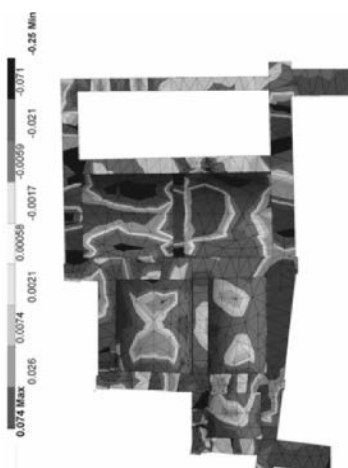


Рис. 2. Нормальные напряжения вдоль оси X вид снизу (1 этаж)

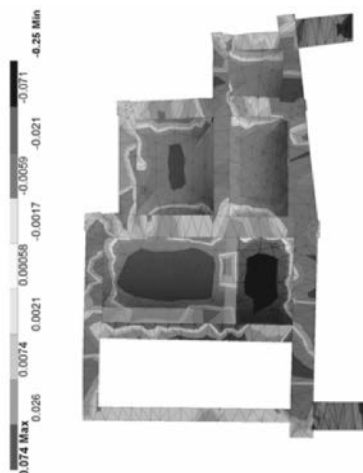


Рис. 3. Нормальные напряжения

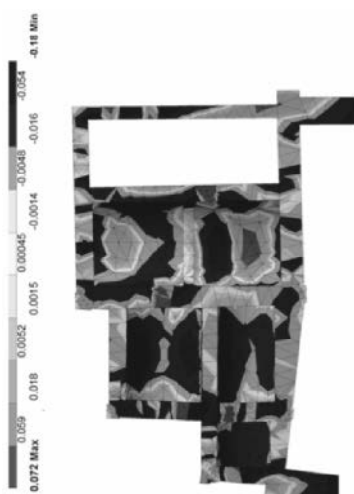


Рис. 4. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид снизу (1 этаж)

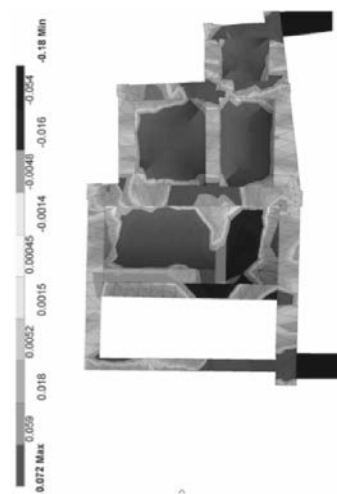


Рис. 5. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид сверху (1 этаж)

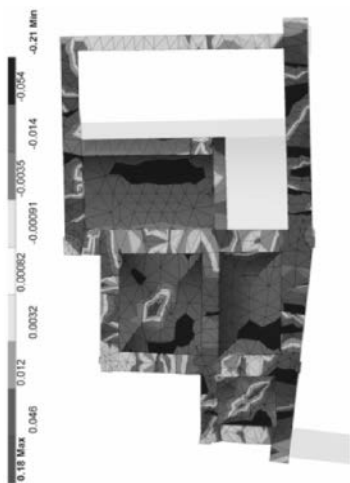


Рис. 6. Нормальные напряжения вдоль оси X вид снизу (2 этаж)

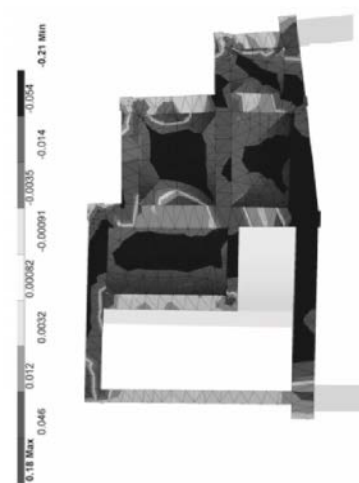


Рис. 7. Нормальные напряжения вдоль оси X вид сверху (2 этаж)

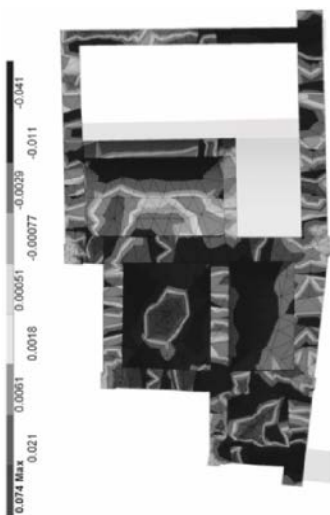


Рис. 8. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид снизу (2 этаж)

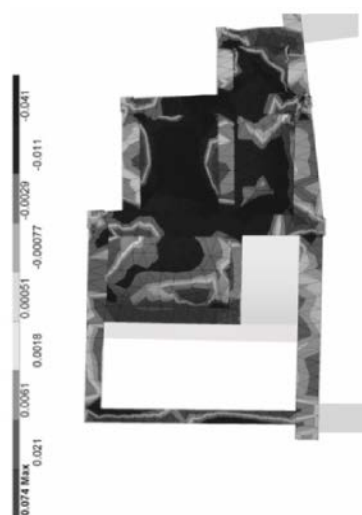


Рис. 9. Нормальные напряжения вдоль оси Y вид сверху (2 этаж)

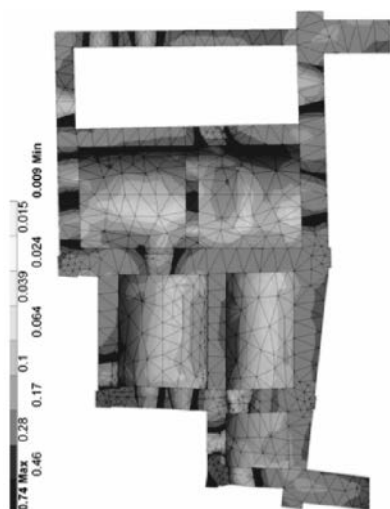


Рис. 10. Эквивалентные напряжения вид снизу (1 этаж)

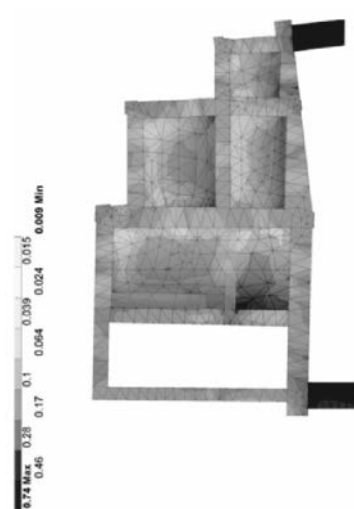


Рис. 11. Эквивалентные напряжения вид сверху (1 этаж)

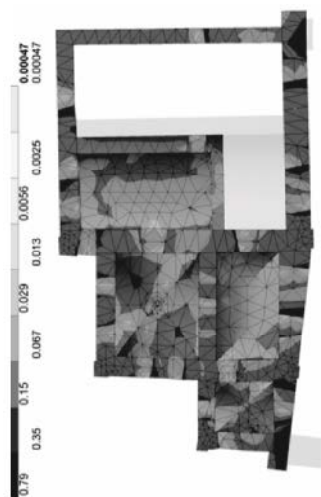


Рис. 12. Эквивалентные напряжения вид снизу (2 этаж)

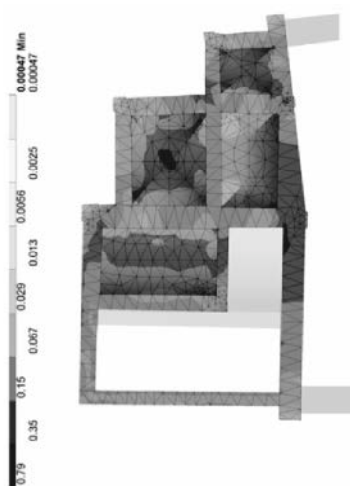


Рис. 13. Эквивалентные напряжения вид сверху (2 этаж)

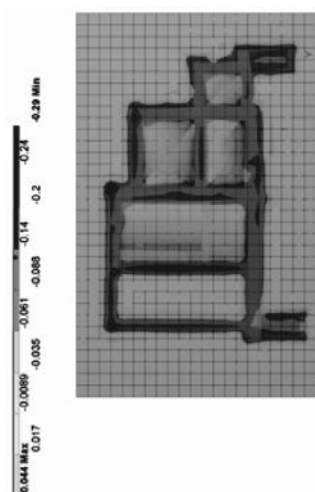


Рис. 14. Напряжения, возникающие под подошвой фундамента

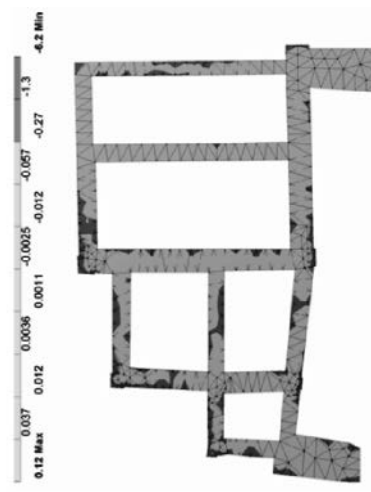


Рис. 15. Эквивалентные напряжения в бутовом фундаменте

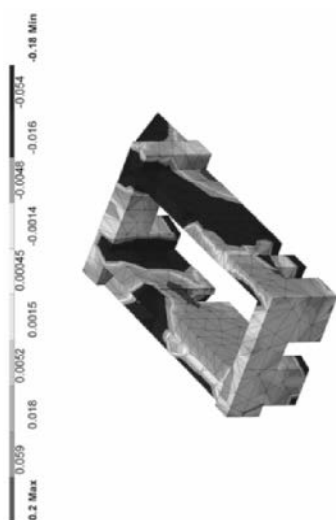


Рис. 16. Нормальные напряжения вдоль оси Y в стенах 4/А-Г и 5/А-Г

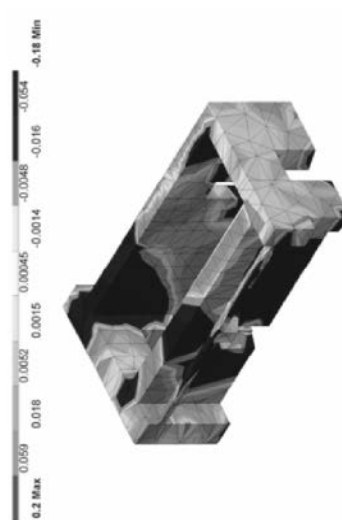


Рис. 17. Нормальные напряжения вдоль оси Y в стенах 4/А-Г и 5/А-Г



По результатам расчета получены напряжения в сводах, стенах и бутовом фундаменте. Участки несущих конструкций с перенапряжением несущих элементов (табл. 1-4). Прочности кирпичных стен и бутового фундамента достаточно для восприятия действующих напряжений.

Таблица 1

**Действующие напряжения в сводах первого этажа по оси X (вдоль буквенных осей)**

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
3-4/А-Г	0,25	Рис. 4	0,074	Рис. 3	

Таблица 2

**Действующие напряжения в сводах первого этажа по оси Y (вдоль цифровых осей)**

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
3-4/А-Г	0,18	Рис. 6	0,072	Рис. 5	

Таблица 3

**Действующие напряжения в сводах второго этажа по оси X (вдоль буквенных осей)**

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
1-2/В-Г	0,21	Рис. 8	0,046	Рис. 7	
2-3/Б-В	0,21	Рис. 8	0,046	Рис. 7	15 %

Таблица 4

**Действующие напряжения в сводах второго этажа по оси Y (вдоль цифровых осей)**

Координаты свода	Напряжения (МПа)				
	Сжатия		Растяжения		Перенапряжение
1-2/В-Г	0,16	Рис. 9	0,074	Рис. 10	
2-3/Б-В	0,16	Рис. 9	0,074	Рис. 10	85 %

Установлено, что основной причиной возникновения перенапряжений сводчатых перекрытия является отсутствие распора от демонтированных и замененных на плоские перекрытия, сводов в осях 4-5, которые должны компенсироваться распором от сводов в осях 3-4, а также не сохранившихся стальных затяжек. Перенапряжение отдельных несущих конструкций в указанных выше местах привело к возникновению дефектов в виде трещин.

Дополнительным поверочным расчетом установлено, что при восстановлении сводов в осях 4-5 и наличия в расчетной схеме стальных затяжек, перенапряжения в несущих элементах отсутствуют.

Таким образом, решение задач реконструкции объектов архитектурного наследия, с применением объёмных элементов в расчетной схеме здания, показало свою эффективность в анализе напряженно-деформированного состояния и рекомендуется для дальнейшего применения.

**Список библиографических ссылок**

1. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Союзреставрация, 1989. 171 с.
2. Milani G. Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults // Advances in Engineering Software. 2015. № 79. P. 91–110.

3. Tianyi Yi. Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia : Georgia Institute of Technology, 2004. 671 p.
4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // Construction and Building Materials. 2013. № 47. P. 1053–1068.
5. Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches // Engineering Structures. 2010. № 32. P. 776–792.
6. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 90–96.
7. Беспалов В. В., Зимин С. С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 11 (50). С. 37–51.
8. Зимин С. С., Беспалов В. В., Казиминова А. С. Расчетная модель каменной арочной конструкции // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2015. № 3 (113). С. 33–37.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture // MATEC Web of Conferences. 2016. № 53. P. 6.
10. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М. : АСВ, 2010. 104 с.

**Strakhov D.E.** – doctor of technical sciences, associate professor

E-mail: [strahov@kgasu.ru](mailto:strahov@kgasu.ru)

**Sakhapova A.I.** – student

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Application of volume finite elements in the reconstructed buildings of architectural heritage**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The work is devoted to the study of the stress-strain state, the reconstructed object of the architectural heritage, a complex configuration, with vaulted structures. The problem is solved with the use of volumetric elements in the design scheme of the building.

*Results.* The stress-strain state of the carrier system, the regularities of the influence of damages on the bearing capacity and suitability for further operation, with recommendations for further application are determined.

*Conclusions.* It is established that the main reason for the overvoltage of vaulted ceilings is the absence of a rasp, from the vaults that have been dismantled and replaced by flat ceilings, which should be compensated by the distance from the neighboring vaults, as well as the remaining steel puffs.

**Keywords:** volumetric finite elements, computational complexes, design models, brick arches, reconstruction.

#### **References**

1. Bessonov G. B. Research of deformations, calculation of bearing ability and constructive strengthening of ancient systems. М. : Soyusrestovratsiya, 1989. 171 p.
2. Milani G. Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults // Advances in Engineering Software. 2015. № 79. P. 91–110.
3. Tianyi Yi. Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia : Georgia Institute of Technology, 2004. 671 p.

4. Anania L., Badala A., D'Agata G. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // *Construction and Building Materials*. 2013. № 47. P. 1053–1068.
5. Cancelliere I., Imbimbo M., Sacco E. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches // *Engineering Structures*. 2010. № 32. P. 776–792.
6. Pavlov V.V., Khorkov E.V. Experimental studies of the work of reinforced brick arches with horizontal support of supports // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 2 (28). P. 90–96.
7. Bespalov V. V., Zimin S. S. Strength of stone masonry vaulted structures // *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2016. № 11 (50). P. 37–51.
8. Zimin S. S., Bespalov V. V., Kazimirova A. S. Calculation model of stone arch construction // *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury* 2015. № 3 (113). P. 33–37.
9. Bespalov V., Orlovich R., Zimin S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture // *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 53. P. 6.
10. Sokolov B. S., Antakov A. B. Research masonry and reinforced masonry structures. M. : ACB, 2010. 104 p.

УДК 692.47

**Удлер Е.М.** – кандидат технических наук, профессор

E-mail: [udler41@mail.ru](mailto:udler41@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая д. 1

### Некоторые аспекты тентовой терминологии

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель работы – формирование набора наиболее специфичных и часто используемых в тентовой строительной тематике русских терминов, определений и понятий и соответствующих им английских аналогов. Для этого был проведен анализ большого числа отечественных и зарубежных публикаций.

*Результаты.* Основным результатом является краткий перечень русских терминов в области тентовых конструкций. К каждому подобран английский перевод и дана краткая характеристика применения или определение его понятия. Предложенный перечень включает только характерные для рассматриваемой области термины.

*Выводы.* Необходимо широкое обсуждение предложенного перечня тентовых терминов специалистами с целью корректировки и дальнейшего развития. Такая работа может стать основой для разработки единого терминологического стандарта в данной области и будет полезным пособием не только в переводах публикаций, но и в обучении и подготовке специалистов.

**Ключевые слова:** термины, понятия, определения, тентовые сооружения, пленочно-тканевые оболочки, растянутые конструкции.

#### Введение

Широкое признание и развитие сооружений с тентовыми ограждениями у нас в стране и по всему миру сопровождается появлением большого количества публикаций на русском и английском языках. Отсутствие единой терминологии усложняет адекватный перевод публикаций и ограничивает возможности обсуждения и оценки достижений.

Считается, что история тентовых сооружений насчитывает несколько веков. На ранних этапах это были довольно примитивные укрытия в виде палаток и шатров с ограждениями из шкур, холстов, парусины или брезента. Но с появлением в последние десятилетия современных высокопрочных синтетических тканей и сеток с атмосферостойкими пленочными покрытиями, тенты стали основой крупнейших и ответственных сооружений культурного, гражданского, промышленного, оборонного и сельскохозяйственного назначения [1]. Большие размеры тентов и, в связи с этим значительные механические нагрузки, высокая ответственность сооружений, под которыми могут находиться большое количество людей и значительные материальные ценности, потребовали пристального внимания научных работников, исследователей и проектировщиков. Естественно появление большого количества как научных, так и популярных и рекламных публикаций о тентовых сооружениях и конструкциях. Анализ публикаций показывает отсутствие единого подхода в использовании определений и понятий в «тентовой» строительной тематике. Это затрудняет понимание информации, вносит путаницу в тентовую терминологию и не отражает уровень современного развития науки и техники в данной области.

Учитывая значительное развитие тентового строительства за рубежом, важным представляется вопрос согласования русских терминов и определений с международными английскими. Перевод публикаций без учета специфики тентовых конструкций не дает полного и адекватного представления об обсуждаемых вопросах. Это касается, в частности, применения исходного в рассматриваемых конструкциях отечественного термина «**тент**». Некоторые исследователи [2] считают его истоками итальянское «*tendere*», переводимое как растянутый. Возможно, термин заимствован в старой голландской (нидерландской по языку) морской терминологии, где «*tente*» имело наиболее близкое смысловое значение, так как обозначало «навес в виде растянутой

парусины для укрытия от атмосферных воздействий» («Морской энциклопедический справочник». Том 1. Под ред. Ак. Н.Н. Исанина. Л.: Судостроение, 1987).

В последнее время в технических публикациях по тентовым конструкциям встречается английский термин *«awning»*, переводимый как *«навес»* или *«палатка»* [3]. Трудно считать палатками современные покрытия из пленочно-тканевых материалов, например, такие, как на рис. 1, взятого с сайта [www.realty.ria.ru](http://www.realty.ria.ru).



Рис. 1. Тентовое покрытие над аэровокзалом в Денвере (США)

Можно встретить и английский термин *«tent»*, в переводе тоже означающим *«палатку»*. Заметим, что глагол *«to tent»* переводится как *«накрываться тентом»* или *«располагаться в палатке»*.



Рис. 2. Тентовый шатер диаметром 50 м на площадке Казань-Ривьера

Находит применение и английский термин *«sanory»*. Его используют как понятие *«навес – шатер»* вроде покрытия, приведенного на рис. 2, в проектировании которого принимал участие автор. В тоже время *«sanory»* можно перевести как *«полог – драпировка»*. Такая неоднозначность терминов и их английских аналогов создает сложности в понимании, обсуждении и оценке специалистами научных и технических решений и достижений в данной области.

**Цель данной работы** – выявить наиболее специфичные и общепризнанные термины, используемые в области тентовых конструкций и сооружений и сформулировать определения к ним с учетом практики применения, как в отечественных, так и зарубежных научных изданиях. Это может быть полезно для разработки нормативной документации в данной области, а также в качестве пособия в переводах технической литературы и в подготовке специалистов – проектировщиков и исследователей.

**Методической основой** работы явились обзор и анализ научно-технической литературы и опыта разработок, исследований и публикаций по тентовым конструкциям, материалам и сооружениям. В определениях к терминам использовались сведения из академических, энциклопедических, профессиональных технических и толковых словарей и справочников [4], а также интернет-переводчики. В статье не анализируются известные общестроительные термины, установленные нормативными документами отрасли, если отсутствуют отличия их понимания в тентовой тематике.

### Особенности геометрии и механики тентовых ограждений

Речь идет о зданиях, сооружениях и конструкциях, основным ограждающим элементом которых является «*мягкая оболочка*». С позиции строительной механики *оболочка* – это твердое тело, ограниченное с двух сторон поверхностями. Ее особенностями являются очень малая толщина в сравнении с остальными размерами, а определение как *мягкой* указывает на неспособность сопротивляться *изгибу*. Эти свойства ей придают пленочно-тканевые материалы, из которых она создается.

В связи с гибкостью, строительные ограждения в виде мягких оболочек могут стабильно функционировать только при условии наличия растягивающих усилий в материале и при криволинейной форме ее поверхности. Натяжение придает им упругость, а криволинейная форма уравнивает действие поперечной нагрузки. Так как внешние нагрузки на ограждения могут иметь разное направление действия, форма оболочки должна иметь вид поверхности двоякой отрицательной гауссовой кривизны. В связи с этим часто тентовые ограждения имеют вид *седловой поверхности*.

В английских переводах слова «*оболочка*» часто используется термин «*shell*». Однако, его русский аналог имеет смысл жесткой оболочки – *скорлупы*, что не соответствует понятию «*мягкая оболочка*». В англоязычной технической литературе можно выделить два подхода. Первый, использует указание на тканевую основу тентовых материалов применением понятия «*textile*» или «*fabric*» – ткань и в связи с тем, что тентовая оболочка всегда находится в состоянии растяжения, добавляется определение «*tensile*» либо «*tension*», что означает «*натянутый*» или «*напряженный*». Второй подход основан на замене понятия оболочки понятиями «*membrane*» – мембрана или «*structure*» – структура, конструкция, сооружение. Например, *tensile surface structure* [5]. Заметим, что слово «*мембрана*» имеет истоками латинское понятие «тонкая пленка». В технике под мембраной понимают гибкую тонкую плёнку или пластинку, обладающую упругостью благодаря наличию напряжения от действия внешних растягивающих усилий или вследствие закрепления по контуру [6].

Механическое натяжение тентовой оболочки обычно осуществляется сосредоточенными усилиями по контуру в узлах крепления к *анкерным устройствам, несущему каркасу или к мачтам*. Для равномерного перераспределения усилий в оболочке, края тентового ограждения превращают в усиленную зону – *силовой пояс*. Оптимальной формой криволинейного внешнего края пояса является *цепная линия* – «*catenary*». Поэтому он носит название *катенарный пояс* или *край*. Конструктивно такое усиление заключается в устройстве по краю тента с помощью дополнительных слоев тентового материала карманов или рукавов, в которые протягивается гибкий трос-подбор. Это может быть любой гибкий стержень, стальной трос, канат или шнур из синтетических волокон – *фал*. Усилие его натяжения регулируется *винтовыми стяжками – талрепами* или *амортизационными шнурами*. Особо ответственным силовым элементом пояса является угловой узел крепления. Здесь сходятся силовые тросы, и в этом месте возникает опасная концентрация усилий в тенте, которая может привести к раздиранию ткани. Поэтому углы тентов усиливают специальными *узловыми пластинами*. На рис. 3 приведен пример устройства катенарного пояса, усиления узлов, а также создания натяжения тентового покрытия с помощью талрепов.



Рис. 3. Катенарный пояс и узлы крепления и натяжения тентовой оболочки

### Специфика свойств тентовых материалов

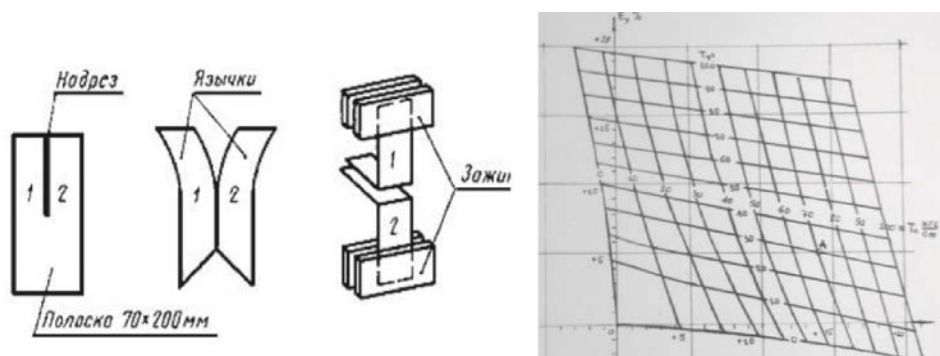
Силовую функцию тентовых материалов выполняют, как правило, технические ткани. Особенностью тканей является их структура или *вид переплетения* нитей [7]. Различают нити двух направлений – продольные, которые называют *нитями основы* и поперечные, с названием *уток*. В тентах в основном применяют ткани полотняного плетения. Нити тканей изготавливают из различных волокон. Например, из полиэстера (*polyester*) – это синтетические волокна на основе полиэтилентерефталата (ПЭТ). Они могут иметь различные фирменные торговые названия: *лавсан*, *дакрон*, *терилен*, *тергаль*, *тревира*, *тетерон*. Изготавливают также ткани из волокон политетрафторэтилена (ПТФЭ). Они носят название *тефлон*. Применяют и ткани из полиамидных волокон – *капрона* и *нейлона*.

Тентовые оболочки являются представителями висячих предварительно напряженных строительных конструкций – «*pre-stress structure*». Они в рабочем состоянии находятся под действием сил двухосного растяжения. Поэтому механические свойства материалов характеризуют не только показателями работы в условиях *одноосного* – «*uniaxial*», но и *двухосного растяжения* – «*biaxial tension*».

Особенностью тканевых материалов является дискретная структура поперечного сечения, вследствие чего в отличие от сплошных материалов величина площади поперечного сечения не является достоверным показателем, относительно которого обычно оцениваются механические характеристики. В связи с этим принято рассматривать силовые характеристики тканей относительно единицы ширины поперечного сечения. Такой подход не позволяет оперировать привычным в механике термином напряжение. Точнее говорить о внутренних усилиях – «*internal forces*».

Тогда *прочность при растяжении* – «*tensile strength*» следует рассматривать как *разрывное усилие*, отнесенное к единице ширины образца. Оно определяется для тканей по ГОСТ 29104.4-91. Для тканей не приемлемо и понятие модуля жесткости. Его правильнее заменить *модулем удлинений*, так как он вычисляется не по напряжениям, а по усилиям и представляет собой тангенс угла наклона касательной к графику одноосного растяжения в координатах усилие-удлинение.

Специфичной характеристикой тканей является *прочность на разрыв* – «*tear strength*», которая представляет собой *раздирающее усилие*, определяемое по ГОСТ 29104.5-91. *Раздир* – вид разрушения тканевых материалов под действием локально приложенной в месте надреза пары противоположно направленных сил. Схема испытаний на раздирание приведена на рис. 4а.



а) схема испытания ткани на раздир

б) нормальная характеристика

Рис. 4. Исследование свойств и характеристик тентовых материалов

Поведение тканей в условиях двухосного растяжения может быть оценено с помощью *Нормальной характеристики*. Это построенные в осях усилий растяжения по основе и утку, две системы кривых соответствующие удлинениям ткани в тех же направлениях. Ее пример приведен на рис. 4б. Впервые идея этой характеристики была предложена немецкими учеными в области дирижаблестроения Р. Гаасом А. Дитциусом еще в 1931 году.

### Специфика формообразования тентовых оболочек

Еще одной специфичной характеристикой тентовых материалов является *формообразующая способность*, предложенная и описанная в работе [8]. Она зависит от сдвиговой податливости ткани, а показателем является предельное значение изменения *сетевого угла ткани* без образования складок и морщин на поверхности, как показано рис 5. Это уникальное свойство тканей позволяет плоскими полотнищами гладко накрывать криволинейные поверхности внушительных размеров.

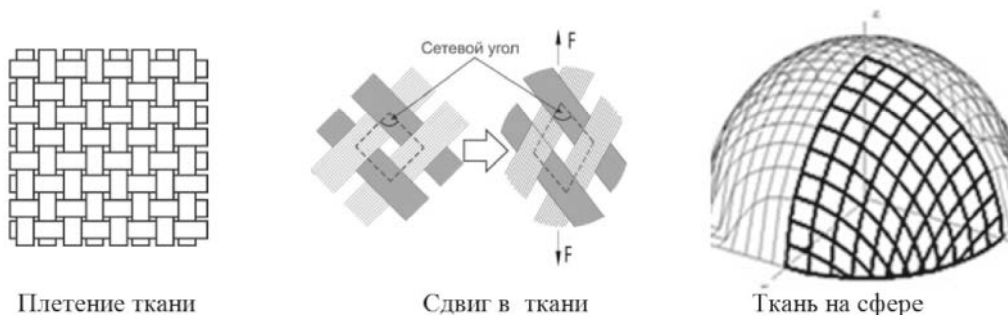


Рис. 5. Схема формообразования ткани за счет изменения сетевого угла

Тентовые покрытия относятся к мгновенно-жестким системам. Их форма зависит от внешней нагрузки, сил предварительного напряжения и деформаций материала. В связи с этим, в процессе проектирования приходится решать сложную задачу *поиска равновесной формы* оболочки. Кроме того, форма тентовых покрытий в виде *поверхностей двоякой кривизны* создает большие сложности при их изготовлении из плоских рулонов ткани, так как эти поверхности не разворачиваются на плоскость. Это требует использования специальных методов раскроя – «*cutting patterns*» и применения компьютерных средств расчета и анализа [9, 10]. Известно несколько подходов в решении задачи раскроя. Один из них основывается на построении *сетей Чебышева* на поверхности оболочки, определения их границ и последующей развертки на плоскость. Примером применения метода может служить работа [11]. Критерием качества раскроя является отсутствие *складок и морщин* на поверхности тента.

Важными элементами тканевых оболочек являются *швы соединений* – «*joint seams*». В основном в тентах применяются *накладные швы*. Важной проблемой при проектировании является *оптимальная ориентация* швов на поверхности оболочки.

### Результаты работы

Основным результатом работы является предлагаемый ниже краткий перечень терминов, используемых в тентовых сооружениях. К ним даны некоторые определения и характеристики. К каждому русскому термину предлагается вариант адекватного англоязычного аналога.

**Анкерные конструкции – Anchor Structures.** Конструкции для крепления тентовых ограждений к основаниям и фундаментам.

**Ванты – Holding Mast Cables.** Мачтовые растяжки в виде тросов, канатов или стержней. От морского голландского термина «Want» – *растяжка корабельных мачт*.

**Двоякой кривизны поверхность – Double Curvature Surface.** Ее важнейшим показателем является **Гауссова кривизна** – произведение главных кривизн поверхности. **Кривизна** величина обратная радиусу. Тентовые оболочки, как правило, должны иметь форму поверхности отрицательной гауссовой кривизны.

**Защитное покрытие ткани – Protective Coating.** Для придания тканям водонепроницаемости и стойкости к атмосферным воздействиям на них разными технологическими приемами наносят защитные пленки из синтетических материалов.

**Каркас – Frame (Carcass).** От франц. «carcasse» – «скелет». Плоская или пространственная стержневая конструкция, поддерживающая ограждение.



**Карты плоского раскроя – Patterns Flat-Cutting Maps.** Схемы разбивки оболочек на раскройные части или элементы.

**Катенарный карман (рукав) – Catenary Poket (Sleeve).** Усиленная полость на краю тента, в которой проходит контурный силовой трос или фал.

**Катенарный край (пояс) – Catenary Edge (Zone).** Криволинейное конструктивное усиление края тентовой оболочки для равномерного перераспределения усилий от сосредоточенного натяжения в узлах.

**Конструкция тентовая – Tensile Fabric Structure.** Строительная структура из совместно работающих стержневых каркасных элементов и растянутых тентовых оболочек.

**Мачта – Mast.** Отдельная высокая опорная конструкции, обычно раскрепленная для устойчивости растяжками – вантами.

**Модуль удлинения – Modulus of Elongation.** Тангенс угла наклона касательной к графику одноосного растяжения ткани в координатах удлинение – усилие.

**Мягкая оболочка – Fabric Membrane.** Тонкая оболочка из пленочно-тканевых материалов, не имеющая изгибной жесткости, растянутая или закрепленная по контуру.

**Навес тентовый – Fabric Awning (Canopy).** Укрытие в виде пленочно-тканевого ограждения закрепленного на каркасе.

**Накладной шов – Lap Seam.** Конструкция шва, в которой один соединяемый элемент накладывается на другой.

**Направление швов – Seams Direction (Orientation).** При проектировании оболочек важно правильно выбрать направление швов соединения полотнищ ткани. Оно должно учитывать направления основных силовых потоков в оболочке, осей армирования ткани (нитей основы и утка) и не мешать формообразованию.

**Нахождение равновесной формы – Form Finding.** Определение конечной (деформированной) формы, которую принимает тентовая оболочка, как висячая система, под действие сил предварительного натяжения и внешних нагрузок.

**Несущая конструкция – Load-Bearing Structure.** Конструкция, воспринимающая нагрузки от ограждения и обеспечивающая стабильность его положения.

**Пластина узловая – Node Plate.** Усилительная пластина в узле крепления тентовой оболочки к каркасу или анкеру.

**Прочность (ткани) при растяжении – Tensile Strength.** Разрывное усилие, отнесенное к единице ширины образца.

**Прочность (ткани) на разрыв (раздир) – Tear Strength.** Усилие при раздирании ткани.

**Прошитый шов – Stitched Seam.** Соединение тентовых материалов сшиванием ниточными швами.

**Раздир(ать) – To tear.** Разрушение тканевых материалов под действием локально приложенной в месте надреза или дефекта пары противоположно направленных сил.

**Сварной шов – Weld Seam.** Способ соединения термопластичных тентовых материалов.

**Седловая форма поверхности – Saddle Shape Surface.** Одна из основных форм поверхностей отрицательной кривизны в тентовых оболочках.

**Сеть Чебышева – Chebyshev Grid.** Сети с равносторонними ячейками, условно накладываемые на оболочки для построения раскроя, учитывающего формообразующие свойства тканей за счет трансформации сетевого угла между нитями.

**Силовой пояс – Reinforced Zone.** Усиленная зона по контуру тентовой оболочки в местах концентрации нагрузок для равномерного перераспределения внутренних усилий.

**Складки и морщины – Folds and Wrinkles.** Поперечные деформации тентовых оболочек. Их появление указывает на образование зон одноосного растяжения и сжимающих усилий.

**Сооружение тентовое – Tensile Textile Structure.** Сооружение с ограждениями из мягких пленочно-тканевых оболочек.

**Талреп – Turnbuckle.** Устройство для натяжения тентов в узлах. Происходит от морского голландского (нидерландского по языку) термина «*talreep*».

**Тент – Tent, Cloth, Canvas.** Изделие из тентового материала, способное после монтажа и натяжения выполнять функцию ограждающей конструкции.

**Тентовый материал – Awning Material.** Прочная техническая ткань или сетка, пропитанные или покрытые гидроизоляционными пленками и защитными средствами от вредного воздействия среды.

**Тентовое покрытие – Tensile Roofing.** Это тентовые предварительно напряженные мембраны, выполняющие роль укрытия, крыши здания или сооружения, любого ограждения защищающего пространство от атмосферных воздействий.

**Ткань техническая – Base Fabric.** Ткань как силовая основа тентовых материалов обычно имеет полотняное переплетение нитей основы и утка, изготовленных из синтетических волокон. Обладает высокими прочностными характеристиками.

**Укрытие – Shelter.** Сооружение для защиты людей и техники от воздействий внешней среды или в целях маскировки (из военной терминологии).

**Фал – Synthetic Cord.** Шнур (канат, веревка) из синтетических волокон. Может быть витым или упакованным в плетеную оболочку.

**Формообразующее свойство ткани – Forming Property of Fabric.** Способность плоского тканевого полотна гладко накладываться на поверхность двоякой кривизны.

**Цепная линия – Catenary.** Форма оси подвешенной за концы тяжелой нити.

**Шаблоны плоского раскроя – Patterns for Flat Cutting.** Готовые чертежи плоского раскроя.

**Шатер – Circus Tent, Marquee.** Высокое палаточное укрытие пирамидальной формы или конической, в т.ч. с криволинейной образующей.

#### **Выводы**

1. В процессе исследования выявилась необходимость дальнейшего расширения перечня терминов и уточнения их определений.

2. Предложенные англоязычные аналоги русских терминов с учетом специфики конструкций, материалов и практики переводов требуют оценки лингвистов.

#### **Список библиографических ссылок**

1. Мыскова О. В. Современные тентовые сооружения: архитектура и дизайн. М. : МГУДТ, 2014. 132 с.
2. Блинов Ю. И. Тентовые здания и сооружения. М. : МИСИ, 1991. 48 с.
3. Rajesh Roddar. Global Tensile Structure. URL: <http://www.globaltensilestructure.com/> (дата обращения: 08.10.2017).
4. Общий толковый словарь русского языка. URL: [http:// www.Tolkslovar.ru](http://www.Tolkslovar.ru) (дата обращения: 20.09.2017).
5. Forster B., Mollaert M. European design Guide for tensile surface structures. Leonberg : Germany, 2004. 354 p.
6. Texarch membrane architecture. URL: <http://www.zepelin.sk> (дата обращения: 10.10.2017).
7. Сулейманов А. М., Каюмов Р. А., Мухамедова И. З. Моделирование поведения материала плетеного композита // Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов : сб. трудов XX междунар. конф. / ВЕМ & FEM-2000. СПб., 2003. С. 249–252.
8. Кудрявцева В. И., Удлер Е. М. Об исследовании формообразующих свойств тентовых материалов // Научное обозрение. 2015. № 19. С. 62.
9. Software for form-finding and cutting pattern membrane structures // Available at <https://www.dlupal.com/> (reference date: 08.10.2017).
10. Wanda J. Lewis. Tension Structures: Form and Behavior. Kent : ICE Publishing, 2017. 210 p.
11. Удлер Е. М. Сеть Чебышева на поверхности сферы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 6. С. 44.

**Udler E.M.** – candidate of technical sciences, professor  
E-mail: [udler41@mail.ru](mailto:udler41@mail.ru)  
**Kazan State University of Architecture and Engineering**  
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Some aspects of tent terminology

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of this work was the formation of a set of the most specific Russian terms, definitions and concepts that are often used in the tent construction theme, and the corresponding English analogues. For this purpose, a large number of domestic and foreign publications were analyzed.

*Results.* The result of the work was a short list of Russian terms in the field of awning structures. To each, an English translation is selected and a brief description of the application or definition of its concept is given. The proposed list includes only the terms that are specific to the field in question.

*Conclusions.* It is necessary a broad discussion of the proposed list of tent terms by specialists with a view to adjusting and further development. Such work can become the basis for the development of a single terminological standard in this field and will be a useful tool not only in translation of publications, but also in teaching and training of specialists.

**Keywords:** terms, concepts, definitions, tent constructions, tensile fabric membranes.

#### References

1. Myskova O. V. Modern awning structures: architecture and design. Moscow: MGUDT, 2014. 132 p.
2. Blinov Yu. I. Awning buildings and structures. M. : MISI, 1991. 48 p.
3. Rajesh Roddar. Global Tensile Structure. URL: <http://www.globaltensilestruture.com/> (reference date: 08.10.2017).
4. Allst Tolkovyi Dictionary of the Russian language. URL: [http:// www.Tolkslovar.ru](http://www.Tolkslovar.ru) (reference date: 20.09.2017).
5. Forster B., Mollaert M. European design Guide for tensile surface structures. Leonberg : Germany, 2004. 354 p.
6. Texarch membrane architecture. URL: <http://www.zepelin.sk> (дата обращения: 10.10.2017).
7. Suleimanov A. M., Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z. Simulation of the behavior of the woven composite material // Mathematical modeling in the mechanics of continuous media. Methods of boundary and finite elements: Coll. of works of the XX<sup>th</sup> international conf. / BEM & FEM-2000. SPb., 2003. P. 249-252
8. Kudryavtseva V. I., Udler E. M. On the study of the forming properties of awning materials // Nauchnoye obozreniye. 2015. № 19. P. 62.
9. Software for form-finding and cutting pattern membrane structures // Available at <https://www.dlupal.com/> (reference date: 08.10.2017).
10. Wanda J. Lewis. Tension Structures: Form and Behavior. Kent : ICE Publishing, 2017. 210 p.
11. Udler E. M. Chebyshev grid on the surface of the sphere // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2014. № 6. P. 44.

УДК 624.019; 624.072

**Хусаинов Д.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [xdmt@mail.ru](mailto:xdmt@mail.ru)

**Пеньковцев С.А.** – кандидат технических наук, старший преподаватель

**Хабибулина А.Г.** – кандидат экономических наук, доцент

E-mail: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Разработка фундаментов балластного типа для стоечных конструкций**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Разработка стоечных конструкций соответствующих требованиям вводимых новых стандартов.

*Результат.* Данная разработка представляет собой сборно-разборный фундамент под опору, включающий отдельные железобетонные блоки в виде призм, установленных на поверхность основания и стянутых между собой горизонтальными тяжами, и анкерные устройства для крепления опор. Железобетонные блоки выполнены в виде полых призм, состоящих из стенок и квадратных днищ, а тяжи выполнены в виде болтов, стягивающих стенки по верху и низу, при этом анкерные устройства для крепления опор выполнены в виде анкеров на днище центральной призмы и горизонтальных распорок между опорой и стенками призмы в верхней ее части.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в том, что разработанный новый тип сборно-разборного фундамента может быть использован для рекламных конструкций и для опор ВЛ от 1 до 10 кВт. Полученные результаты численных расчетов подтверждают, что несущая способность и требуемая деформативность данных фундаментов от действия расчетных моментов обеспечиваются.

**Ключевые слова:** фундамент, опора, сборно-разборный, балластный, железобетонные блоки.

В последние десятилетия самое широкое применение получили стоечные конструкции, предназначенные для установки в различных по назначению местах с целью их использования в качестве конструкций рекламного, энергетического, коммуникационного назначения. Одним из основных факторов способствующих их распространению является простота их конструктивной формы, состоящей из несущего стержня – столба, его фундамента и носителя информации или устанавливаемого оборудования, выполняемого в виде крепления к определенной поддерживающей стержневой системе в виде стоек или балок.

Особенностью современных тенденций во вводимых новых стандартах, касающихся стоечных конструкций, являются [1]:

1. Повышенные требования к демонтажу стоечных конструкций, включая их фундаменты.
2. Введение ограничений на места установки стоечных конструкций путем запрета их установки в зоне расположения коммуникаций, в зонах массового нахождения людей (остановочные платформы и стоянки), с удалением положения конструкций от транспортных дорог и развязок.

Большинство этих ограничений связано со сложностью демонтажа наиболее массовых типов фундаментов заглубленного типа: свайных или мелкого заложения, которые из-за особенностей стоечных систем, как правило, изготавливаются из монолитного железобетона массивного по массе и размерам. Все эти типы фундаментов невозможно использовать во временных стоечных системах, устанавливаемых в зоне нахождения коммуникаций, на период проведения зрелищных мероприятий и ремонтных работ, а также в стесненных условиях городской застройки. Необходимость установки стоечных конструкций в условиях указанных ограничений привела к возникновению новых конструктивных решений фундаментов, а именно, фундаменты балластного типа,

устанавливаемые на поверхность земли без ограничений на установленное время [2-4].

Основываясь на российском и зарубежном опыте, авторами получен патент [5-8]. В патенте РФ № 2625060 от 11.07.2017 г. предложено конструктивное решение фундамента балластного типа, обладающее повышенной легкостью монтажа и демонтажа, возможностью изменения размеров в зависимости от величин воспринимаемых расчетных нагрузок. Разработанная конструкция представляет собой сборно-разборный фундамент под опору, включающий отдельные железобетонные блоки в виде призм 1, с отверстиями 2 для болтов 3, установленных на поверхность основания и стянутые между собой горизонтальными тяжами, и анкерные устройства 5 для крепления опор. Железобетонные блоки выполнены в виде полых призм, состоящих из стенок и квадратных днищ, а тяжи выполнены в виде болтов, стягивающих стенки по верху и низу, при этом, анкерные устройства 5 для крепления опор выполнены в виде анкеров на днище центральной призмы и горизонтальных распорок 6 между опорой и стенками призмы в верхней ее части.

Сборно-разборный фундамент под опору реализуется следующим образом (рис. 1): железобетонные блоки в виде полых квадратных призм 1 устанавливаются на основание и стягиваются между собой болтами 3 устанавливаемые в отверстия 2 в стенках призм. Опора 4 устанавливается на днище центральной призмы и закрепляется анкерными болтами 5, а на уровне верха призмы распорками 6. Для повышения несущей способности фундамента на опрокидывание, полость призм заполняется сыпучим инертным материалом, например, щебнем. Демонтаж фундамента происходит в обратной последовательности: сначала из полостей призм убирается щебень 7, затем освобождаются распорки 6 и анкерные болты 5 опоры. После демонтажа опоры 4, освобождаются болты 3, стягивающие стенки призм.

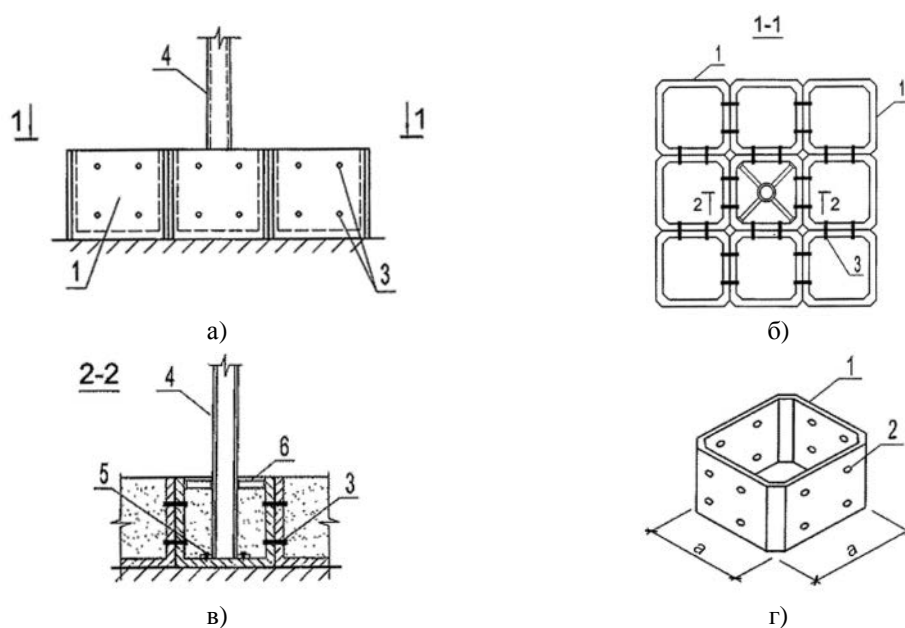


Рис. 1. Сборно-разборный фундамент под опору:

а – общий вид; б – вид сверху, разрез 1-1; в – разрез 2-2;

г – аксонометрия железобетонного блока в виде полых квадратной призмы с размерами днища «а»

Сборно-разборный фундамент позволяет уменьшить его массу при транспортировании и монтаже, а также снизить расход материалов и трудоемкость на крепление железобетонных блоков-призм и опоры. Главным преимуществом предлагаемого сборно-разборного фундамента является быстрота его возведения без проведения земляных работ и возможность более легкого демонтажа по сравнению с используемыми типами фундаментов. Данная особенность делает привлекательным использование данных фундаментов в стесненных (городских) условиях, в условиях ограничений на использование земляных работ, для быстрой ликвидации аварий участков ВЛ с необходимостью установки новых опор вместо разрушенных, для установки опор в удаленных и труднодоступных местах.

Для оценки возможности применения данного конструктивного решения фундамента был выполнен его расчет на действие расчетных ветровых нагрузок, вызывающих появление расчетных моментов до 10 Тм для рекламных типовых конструкций и от 2 до 7,5 Тм для опор линий ВЛ (высоковольтных линий) от 6 до 10 кВт. При расчетах варьировали величину засыпки в пазухи фундамента. При этом рассматривались варианты засыпки из местного грунта. Расчет грунта под подошвой фундамента принимался соответствующим наиболее вероятному и неблагоприятному варианту в виде насыпного грунта. Так как планируется использовать данный тип фундамента по многогранные опоры ВЛ, требующие для их опирания и крепления труб диаметром от 245 до 530 мм были выбраны 2 варианта ячеек размером 0,6×0,6×0,6 м и 1×1×1 м.

Расчет выполнен в программном комплексе «Лира-САПР». Расчетная схема конструкции представляет собой пространственную конечно-элементную модель «фундамент – грунтовое основание», состоящую из объемных 6-ти и 8-ми узловых физически нелинейных элементов грунта, объемных 6-ти и 8-ми узловых линейных элементов, моделирующих железобетонный фундамент, и стержневых элементов односторонних упругих связей, моделирующих граничный слой опирания фундамента на грунт. Для обеспечения возможности приложения внешних нагрузок для фундаментного блока, расположенного в центре, смоделированы закладные детали, которые условно приняты в виде стержней с жесткостью много большей, чем жесткость элементов основной схемы. Соединение закладных деталей и поверхностей фундаментного блока выполнено с использованием абсолютно жестких тел [9, 10].

В качестве грунта был принят насыпной песок. Класс бетона фундамента принят В25. Характеристики конечных элементов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики конечных элементов

№ п/п	Наименование	Характеристики		
		КЭ грунта	КЭ фундамента	КЭ односторонней связи по Z
1	2	3	4	5
1	Тип КЭ	271-274	34, 36	262
2	$E_0, МПа$	10	30000	-
3	$\nu$	0,3	0,2	-
4	$\rho, м/м^2$	1,6	2,5	-
5	$s_{max}^+, МПа$	0,001	-	-
6	$s_{min}^-, МПа$	-0,05	-	-
7	$C, МПа$	0,001	-	-
8	$\alpha$	30	-	-
9	$R_z, м/м$	-	-	1000

Рассмотрено 2 варианта моделей, состоящих из 9 и 25 ячеек фундаментных блоков. Расчет был выполнен на реальные нагрузки, позволяющие использовать наш фундамент для типовых рекламных щитов (для них расчетный момент 10 Тм), для опор высоковольтных линий со стальными многогранными опорами по типовой серии 3,407 от 6 до 10 кВт (с расчетным моментом от 3-5,5 Тм). При расчете учитывалась величина отрыва опор от грунта, которая по СП 22.13330.2011 «Основания и фундаменты» не должна превышать  $\frac{1}{4}$  размера подошвы. Вес одного элемента фундамента составляет 200 кг (для блока 600×600×600 мм), что позволяет использовать при монтаже только простейшую технику типа «Сам грузу сам вожу». Вес 25-ти элементов для фундамента размером 3×3 м составляет около 5 тонн. В варианте с монолитным бетонным фундаментом с размерами 3×3×0,6 м вес его будет в 2 раза больше. Расчет фундаментов проводился при самом невыгодном состоянии грунта в месте монтажа опоры: насыпной грунт с расчетным сопротивлением не более 1 кг/см<sup>2</sup>.

Использовалась расчетная схема с моделированием грунта упругими опорами. Упругие опоры, реализованные в программном комплексе «ЛИРА», работают только на сжатие. Массив грунта под опорой моделировался грунтом со средними деформационными характеристиками: с модулем упругости 10 МПа. Было принято 2 последовательных нагружения: нагружение 1 – вертикальные нагрузки, включая собственный вес фундамента и засыпки; нагружение 2 – изгибающий момент. Каждое нагружение включало 3 равных шага приложения нагрузки. Расчетная схема фундамента и схема приложения нагрузок показана на рис. 2.

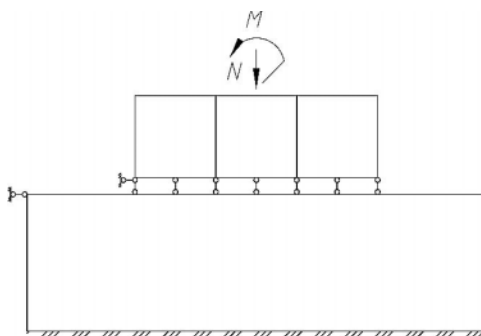


Рис. 2. Расчетная схема

Основные результаты компьютерного моделирования приняты в соответствии с рис. 3 и представлены в табл. 2-3.

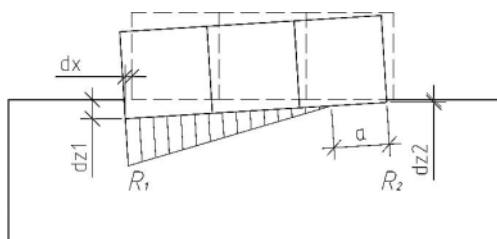


Рис. 3. Схема оценки результатов

Таблица 2

Основные результаты расчета для размера 600×600 мм

№ п/п	Величина момента Исх./факт. М, Тм	Плотность засыпки, т/м <sup>2</sup>	Результаты								Прим.
			Напряжения в грунте, МПа			Перемещение, мм			Сред. напр-я в бетоне, МПа		
			R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	a, мм	dz2	dz1	dx	N <sub>1</sub>	N <sub>3</sub>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фундамент 3×3 м											
1	1	1,6	-0,009	-0,003	0	-1,82	-3,1	-0,05	0,44	-0,53	Армирование не требуется
2	3,5	1,6	-0,04	0,001	510	-0,94	-6	-1	1,5	-1,3	Требуется армирование
3	3,5	1,3	-0,039	0,001	600	-0,71	-5,57	-0,93	1,5	-1,3	Требуется армирование
4	3,5	1	-0,04	0,0009	750	-0,51	-5,53	-0,94	1,49	-1,32	Требуется армирование
5	5/3,3	1,6	-0,045	0,001	600	-0,83	-6,8	-1,5	1,69	-1,45	Требуется армирование Разрушение!
6	7,5/2,5	1,6	-0,034	0,001	300	-1,12	-4,8	-0,55	1,6	-1,67	Требуется армирование Разрушение!
7	10/3	1,6	-0,1	0,001	1770	+3000	-166	41	5,2	-2	Отрыв, разрушение!
Фундамент 5×5 м											
8	5	1,6	-0,027	-0,001	0	-1,45	-3,6	-0,1	2,65	-1,05	Требуется армирование
9	7,5	1,6	-0,03	-0,003	160	-1	-4,31	-0,3	4,11	-1,53	Требуется армирование
10	10	1,6	-0,037	0,001	540	-0,67	-5,4	-0,8	5,56	-2,01	Требуется армирование

Примечание

1. Разрушение происходит по грунту.
2. Значение dz со знаком «->» соответствует перемещению вниз, dx со знаком «->» соответствует перемещению влево.
3. Значения напряжений со знаком «->» соответствуют сжатию.
4. Для бетона указаны средние значения главных напряжений.

Таблица 3

## Основные результаты расчета для размера 1000×1000 мм

№ п/п	Величина момента Исх./факт. М, тм	Плотность засыпки, т/м <sup>2</sup>	Результаты								Прим.
			Напряжения в грунте, МПа			Перемещение, мм			Макс. напр-я в бетоне, МПа		
			$R_1$	$R_2$	a, мм	$dz_1$	$dz_2$	$dz_2$	$N_1$	$N_3$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фундамент 3×3 м											
1	3,5	1,6	-0,032	-0,021	0	-5,86	-7,37	-0,31	0,98	-1,44	Армирование не требуется
2	3,5	1,3	-0,028	-0,018	0	-4,9	-6,33	-0,12	0,99	-1,43	Армирование не требуется
3	3,5	1	-0,026	-0,015	0	-4,04	-5,4	-0,04	1,0	-1,41	Армирование не требуется
4	5	1	-0,028	-0,012	0	-3,7	-6,04	-0,17	1,81	-2,19	Требуется армирование
5	5	1,3	-0,031	-0,015	0	-4,57	-7,01	-0,32	1,8	-2,19	Требуется армирование
6	5	1,6	-0,034	-0,017	0	-5,5	-8,17	-0,66	1,8	-2,2	Требуется армирование
7	7,5	1	-0,031	-0,009	0	-3,25	-6,91	-0,41	2,8	-3,18	Требуется армирование
8	7,5	1,3	-0,037	-0,01	0	-4,12	-8	-0,72	2,8	-3,18	Требуется армирование
9	7,5	1,6	-0,037	-0,012	0	-5,03	-9,4	-1,35	2,8	-3,19	Требуется армирование
10	10	1	-0,034	-0,004	0	-2,77	-7,95	-0,8	3,82	-4,17	Требуется армирование
11	10	1,3	-0,037	-0,006	0	-3,62	-9,22	-1,34	3,82	-4,17	Требуется армирование
12	10	1,6	-0,041	-0,009	0	-4,54	-10,88	-2,25	3,81	-4,17	Требуется армирование
Фундамент 5×5 м											
13	3,5	1,6	-0,038	-0,027	0	-7,15	-7,72	-0,95	0,96	-1,52	Армирование не требуется
14	5	1	-0,026	-0,018	0	-4,56	-5,29	-0,03	1,77	-2,27	Требуется армирование
15	5	1,3	-0,028	-0,021	0	-5,52	-6,32	-0,2	1,76	-2,28	Требуется армирование
16	5	1,6	-0,032	-0,017	0	-7,02	-8,01	-1,15	1,76	-2,28	Требуется армирование
17	7,5	1	-0,026	-0,011	0	-4,41	-5,51	-0,06	2,76	-3,23	Требуется армирование
18	7,5	1,3	-0,029	-0,021	0	-5,36	-6,59	-0,3	2,76	-3,24	Требуется армирование
19	7,5	1,6	-0,033	-0,024	0	-6,87	-8,38	-1,41	2,76	-3,24	Требуется армирование
20	10	1	-0,027	-0,017	0	-4,26	-5,74	-0,09	3,76	-4,19	Требуется армирование
21	10	1,3	-0,029	-0,019	0	-5,2	-6,88	-0,42	3,75	-4,2	Требуется армирование
22	10	1,6	-0,034	-0,021	0	-6,7	-8,79	-1,7	3,75	-4,2	Требуется армирование

Примечание

1. Разрушение происходит по грунту.
2. Значение  $dz$  со знаком «-» соответствует перемещению вниз,  $dx$  со знаком «-» соответствует перемещению влево.
3. Значения напряжений со знаком «-» соответствуют сжатию.

В табл. напряжение в грунте  $R_1$  и  $R_2$  показывают возможный отрыв подошвы фундамента (со знаком плюс) или его отсутствие (знак минус) от грунта основания.

Результаты расчетов и виды расчетных моделей в графической форме приведены на рис. 4-12.



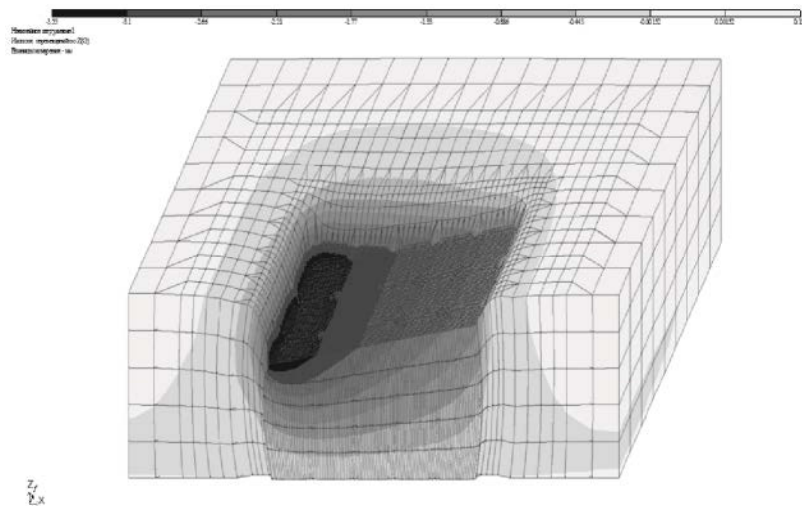


Рис. 4. Изополюс перемещений по Z(G) в грунте

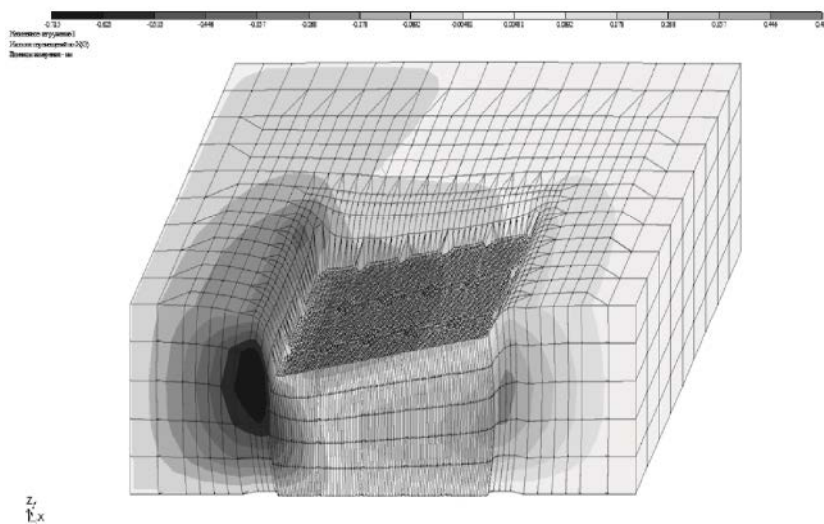


Рис. 5. Изополюс перемещений по X(G) в грунте

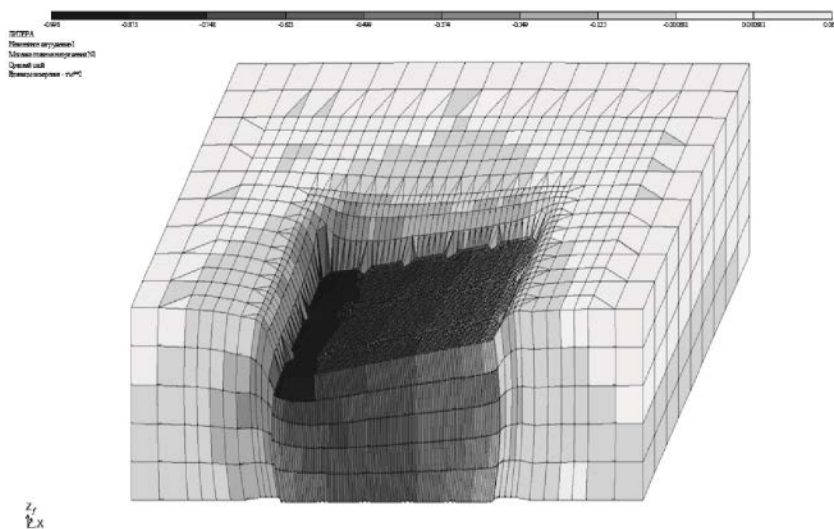


Рис. 6. Мозаика главных напряжений  $N_1$  в грунте

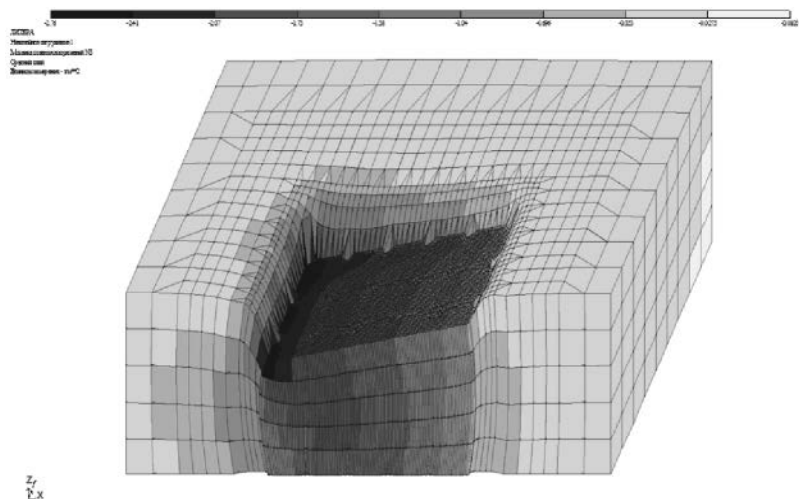


Рис. 7. Мозаика главных напряжений  $N_3$  в грунте

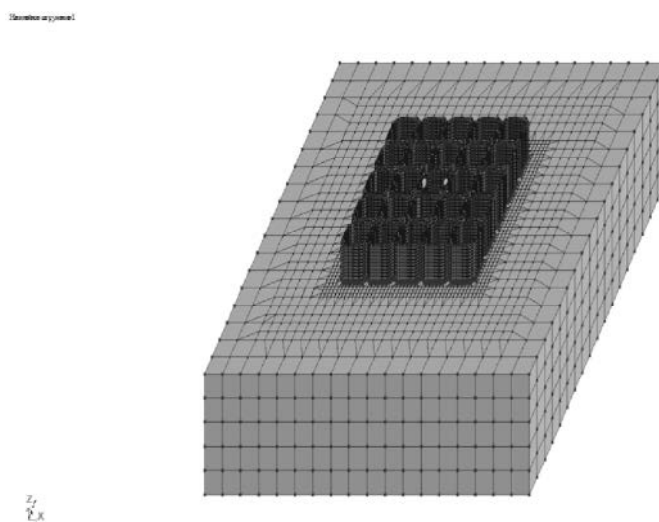


Рис. 8. Общий вид модели

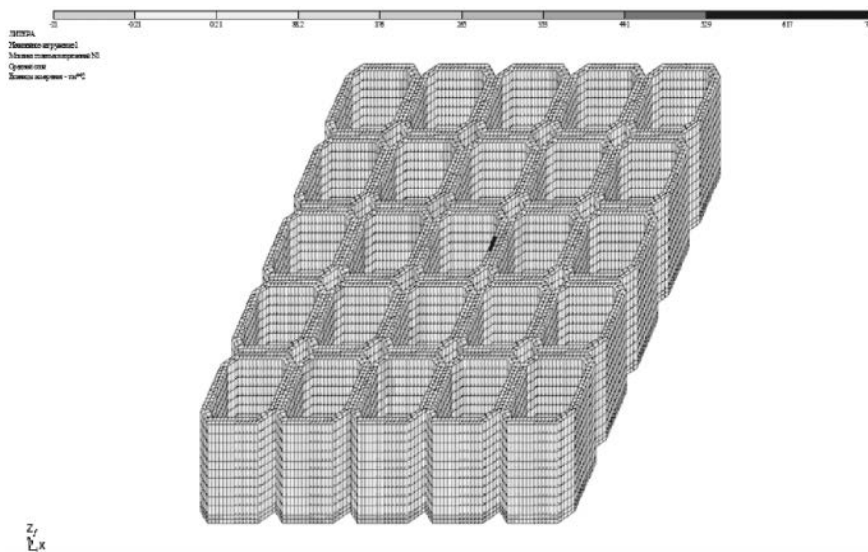


Рис. 9. Мозаика главных напряжений  $N_1$  в бетоне

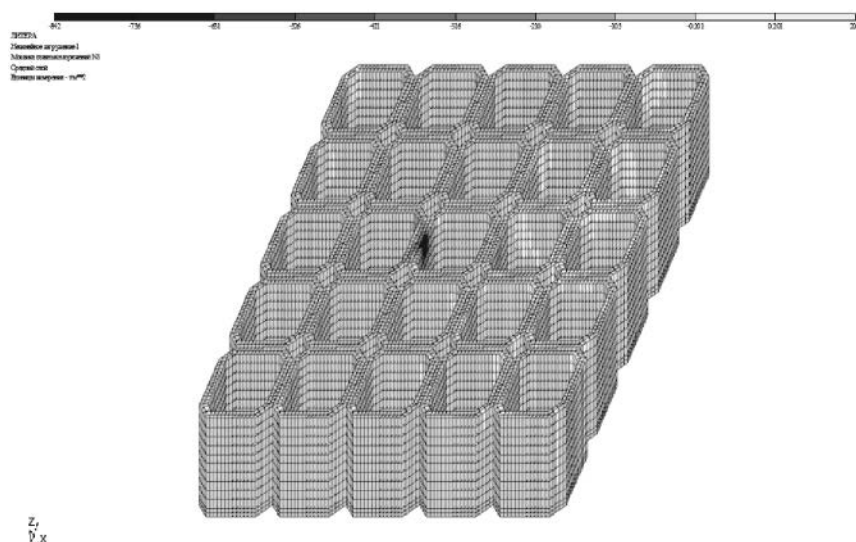


Рис. 10. Мозаика главных напряжений  $N_3$  в бетоне

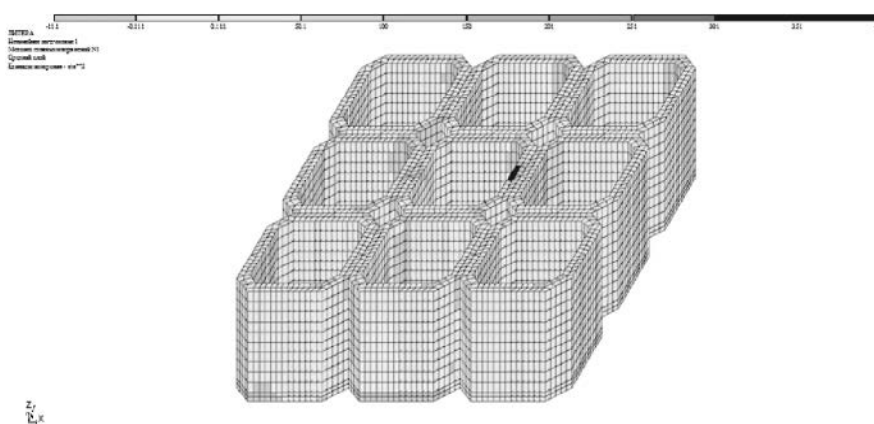


Рис. 11. Мозаика главных напряжений в бетоне фундамента

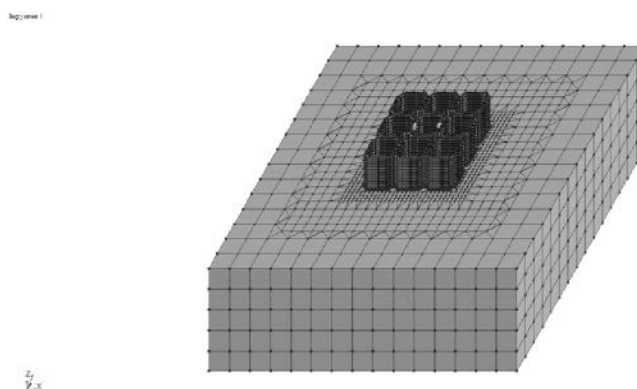


Рис. 12. Общий вид модели 3×3

Проведенные численные исследования позволили определить для рассмотренного диапазона расчетных нагрузок необходимые для их восприятия параметры фундаментов: количество ячеек и их размеры, армирование ячеек, тип засыпки полости ячеек. Полученные результаты численных расчетов позволяют сделать однозначный вывод о возможности использования разработанного типа сборно-разборного фундамента как для рекламных конструкций так и для опор ВЛ от 1 до 10 кВт. Несущая способность и требуемая деформативность данных фундаментов от действия расчетных моментов обеспечивается.

### Список библиографических ссылок

1. Красник В. В. Правила устройства электроустановок в вопросах и ответах. М. : ЭНАС, 2012. 512 с.
2. Хусаинов Д. М., Козлов М. В., Шагиева Г. Р. Определение оптимальных размеров фундаментов рекламных конструкций балластного типа // Известия КГАСУ. 2012. № 4 (22). С. 171–174.
3. Ахунова З. Р., Хусаинов Д. М., Кузнецов И. Л., Стрелков Ю. М., Сабитов Л. С. Сборно-разборный фундамент под опору : сб. трудов Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016» / КНИАТ. Казань, 2016. С. 227–230.
4. Sabitov L. S., Kashapov N. F., Gilmanishin I. R., Strelkov Yu. M., Khusainov D. M. Development and investigation of the stressed-deformed state of the demountable foundation for support // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. 8 p.
5. Рекламный щит : пат. 2243596 Рос. Федерация. № 2003109272 ; заявл. 01.04.2003 ; опубл. 27.12.2004, Бюл. № 36. 2 с.
6. Tube pile foundation // KAAL.NL : official website. 2012. URL: <http://www.kaal.nl/en/tubepilefoundation> (дата обращения: 01.05.2016).
7. Precast post tensioned foundation system // CELLBLOCKSINC.COM : official website. 2008. URL: <http://www.cellblocksinc.com/> (дата обращения: 01.05.2016).
8. Сборно-разборный фундамент под опору : пат. 2625060 Рос. Федерация. № 2016121298 ; заявл. 30.05.2016 ; опубл. 11.07.2017, Бюл. № 20. 2 с.
9. Shaishav R. Viradiya, Tarak P. Vora comparative study of experimental and analytical results of FRP strengthened beams in flexure // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. V. 03. P. 555–561.
10. Соколов Б. С., Радайкин О. В., Абудерб С. С. Применение компьютерного моделирования для анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов в зоне совместного действия изгибающих моментов и перерезывающих сил // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. 2016. С. 388–393.

**Khusainov D.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [xdmt@mail.ru](mailto:xdmt@mail.ru)

**Penkovtsev S.A.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

**Khabibulina A.G.** – candidate of economical sciences, associate professor

E-mail: [albgomer@mail.ru](mailto:albgomer@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Development of the foundations of the ballast type for rack-mounted construction

#### Abstract

*Problem statement.* The development of mullion structures meet the requirements introduced by the new standards.

*Results.* This development is a collapsible foundation for support, which includes separate reinforced concrete blocks in the form of prisms installed on the surface of the base and pulled together by horizontal strings, and anchor devices for supporting the supports. The reinforced concrete blocks are made in the form of hollow prisms consisting of walls and square bottoms, and the strings are made in the form of bolts that tighten the walls along the top and bottom, while the anchoring devices for fastening the supports are made in the form of anchors on the bottom of the central prism and horizontal spacers between the support and the walls of the prism in its upper part.

*Conclusions.* Significance for the construction industry is that a new type of prefabricated

base can be used for advertising structures and supports for overhead lines from 1 to 10 kW. The obtained numerical results confirm that the bearing capacity and deformability data of the required foundations from the action of design moments are provided.

**Keywords:** foundation, pillar, demountable, ballast, reinforced concrete blocks.

### References

1. Krasnik V. V. Rules for electrical installation in questions and answers. M. : ENAS, 2012. 512 p.
2. Khusainov D. M., Kozlov M. V., Shagieva G. R. To determine the optimal size of the foundations of advertising structures ballast type // *Izvestiya KGASU*. 2012. № 4 (22). P. 171–174.
3. Akhunova Z. R., Khusainov D. M., Kuznetsov I. L., Strelkov Yu. M., Sabitov L. S. Demountable foundation for pillar // *Materials of the international scientific and technical conference «Innovative machine-building technologies, equipment and materials – 2016» / KNIAT. Kazan, 2016. P. 227–230.*
4. Sabitov L. S., Kashapov N. F., Gilmanshin I. R., Strelkov Yu. M., Khusainov D. M. Development and investigation of the stressed-deformed state of the demountable foundation for support // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 8 p.
5. Billboard : patent 2243596 of the Rus. Federation. № 2003109272 ; decl. 01.04.2003 ; publ. 27.12.2004, Bull. № 36. 2 p.
6. Tube pile foundation // KAAL.NL : official website. 2012. URL: <http://www.kaal.nl/en/tubepilefoundation> (reference date: 01.05.2016).
7. Precast post tensioned foundation system // CELLBLOCKSINC.COM : official website. 2008. URL: <http://www.cellblocksinc.com/> (reference date: 01.05.2016).
8. Demountable foundation for pillar : patent 2625060 of the Rus. Federation. № 2016121298 ; decl. 30.05.2016 ; publ. 11.07.2017, Bull. № 20. 2 p.
9. Shaishav R. Viradiya, Tarak P. Vora comparative study of experimental and analytical results of FRP strengthened beams in flexure // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. V. 03. P. 555–561.
10. Sokolov B. S., Radaykin O. V., Abuberb S. S. Application of computer simulation for analysis of the stressed-deformed state of bent concrete reinforced elements in the zone of joint action of bending moments and shear forces In the collection // *Sovremennyye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy, zdaniy i sooruzheniy na avariynnye vozdeystviya*. 2016. P. 388–393.



УДК 624.153.6

**Мирсайпов И.Т.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)

**Королева И.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [79178711218@yandex.ru](mailto:79178711218@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Особенности деформирования глинистых грунтов при повышающемся режимном нагружении**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Основной целью выполненных исследований является изучение особенностей деформирования глинистого грунта нарушенной структуры в условиях режимного циклического нагружения при повышающемся уровне вертикальной нагрузки с учетом высоких уровней боковых напряжений. На сегодняшний день отсутствуют данные о результатах исследований при указанном режиме нагружения.

*Результаты.* В качестве основных результатов исследований можно отметить получение новых данных об особенности развития относительной вертикальной деформации в зависимости разных значений девиаторных напряжений цикла в исследуемых образцах при высоких уровнях боковых напряжений. На основании выполненного анализа результатов исследований установлены некоторые закономерности поведения образцов глинистых грунтов при режимных циклических и длительно-статических трехосных нагружениях.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в исследовании особенностей деформирования образцов глинистого грунта нарушенной структуры при перемене режима нагружения при высоких уровнях боковых напряжений, а также в установлении влияния вертикальной нагрузки цикла на напряженно-деформированное состояние глинистого грунта и скорость его деформирования. Установлено, что предшествующее нагружение существенно влияет на скорость развития вертикальных деформаций образца, то есть на деформационные характеристики глинистого грунта нарушенной структуры.

**Ключевые слова:** глинистый грунт, режимное нагружение, трехосное сжатие, структурное упрочнение, деформации.

#### **Введение**

Основания зданий и сооружений подвергаются воздействию статических и циклических нагружений. При этом в реальных условиях загрузки грунтов основания вышеперечисленные воздействия могут прикладываться в различной последовательности и могут иметь некоторую неодинаковую продолжительность [1-7]. Однако, на сегодняшний день, при расчете оснований зданий и сооружений по второй группе предельных состояний рассматривается только монотонное постоянно действующее нагружение. Механические характеристики грунта определяются по результатам однократных статических нагружений, при этом лишь трехосные испытания учитывают влияние боковых нагрузок прочность и деформации образца. Изменение характеристик грунтового основания в процессе приложения внешних режимных нагрузок не учитывается.

Существующие экспериментальные и теоретические исследования показывают, что механические параметры глинистых грунтов в условиях реального нагружения не являются постоянными величинами и их значения существенно зависят от режима приложения нагрузки [1-10].

Наибольший интерес вследствие недостаточной изученности представляет собой режимное циклическое нагружение с высокими значениями боковых давлений  $\sigma_2 = \sigma_3$  при поэтапном повышении вертикальной нагрузки  $\sigma_1$ . В связи с вышеизложенным, на кафедре в приборе истинного трехосного сжатия были проведены экспериментальные исследования и изучено деформирование глинистого грунта при указанном режиме нагружения.

### Экспериментальные исследования

Исследование процесса деформирования в условиях режимного циклического нагружения выполнено на образцах глинистого грунта нарушенной структуры с заданными параметрами плотности-влажности, изготовленного по методике, разработанной на кафедре Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии. Испытания проводились в приборе трехосного сжатия в условиях комбинированного режимного нагружения при высоком уровне боковых напряжений. Программой запланировано две серии экспериментов по режимам, представленным на рис. 1. В обеих сериях экспериментов было предусмотрено всестороннее нагружение  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , которое прикладывалось в три этапа по 80 кПа. В первом случае (рис. 1а) девиаторное нагружение составило 90 кПа, после чего грунт подвергся блоку статического нагружения в течение 60 минут. Во втором эксперименте (рис. 1б) к образцу приложено статическое девиаторное нагружение 60 кПа, которое длилось 60 мин. Затем к обоим образцам был приложен блок циклической нагрузки с амплитудой цикла  $\Delta\sigma_{1(1)}$ , которая составила 0,09 МПа и 0,06 МПа соответственно. Следующим этапом нагружения был блок длительной статической нагрузки, который продлился 1 сутки. Указанный блок сменился блоком режимного циклического нагружения, когда к образцу сначала приложена циклическая нагрузка с амплитудой цикла  $\Delta\sigma_{1(1)} = \Delta\sigma_{1(2/1)}$ , а затем амплитуда цикла была увеличена до  $\Delta\sigma_{1(2/2)}$ . На смену вышеназванному блоку пришел блок длительного статического нагружения, а затем циклического нагружения (рис. 1), который привел к разрушению образца (циклическая нагрузка прикладывалась до достижения образцом предельных деформаций).

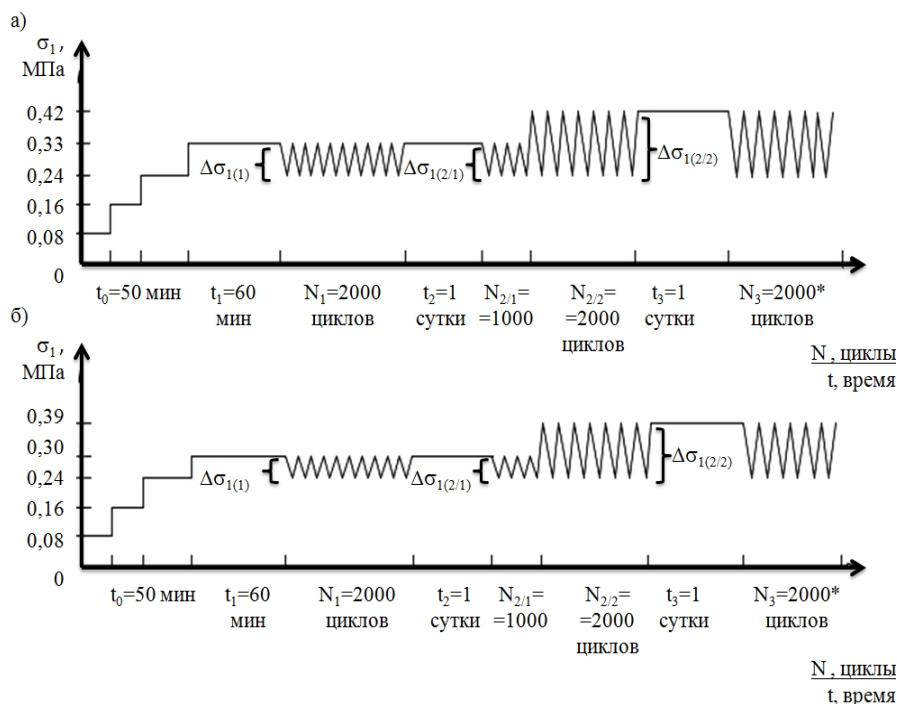


Рис. 1. Режим повышающегося блочного нагружения: а) Серия № 1; б) Серия № 2

В ходе экспериментальных исследований вертикальные и горизонтальные деформации образцов грунта фиксировались по индикаторам часового типа, особое внимание уделялось начальному этапу загрузки, росту деформаций за первые тысячу циклов каждого блока циклического нагружения, а также временным интервалам, соответствующим смене режима с циклического на длительно-статический. По результатам экспериментальных исследований построены графики развития относительных вертикальных деформаций на различных блоках нагружения, при этом величина накопленной деформации на предыдущих блоках нагружения принималась равной нулю.

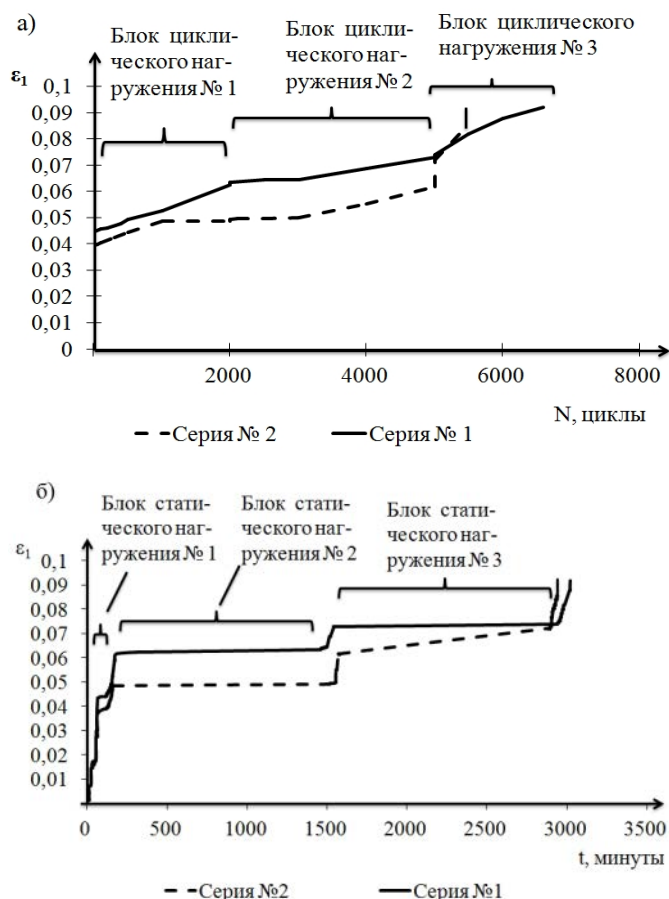


Рис. 2. График развития относительных вертикальных деформаций в условиях повышающегося блочного нагружения: а) от количества циклов нагружения; б) во времени

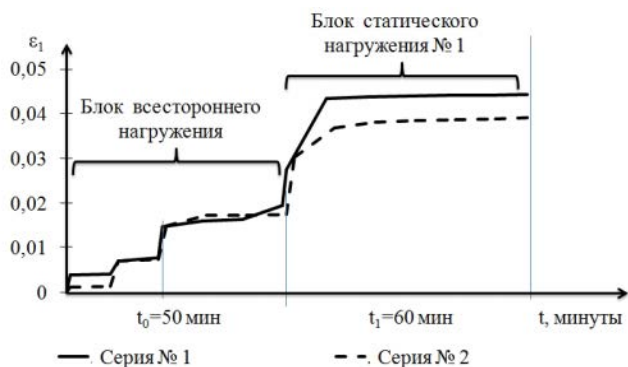


Рис. 3. График развития относительных вертикальных деформаций в условиях повышающегося блочного нагружения: а) от количества циклов нагружения; б) во времени

Установлено, что деформации с различной скоростью развиваются в течение всего эксперимента (рис. 2). Как видно из графиков, при высоких уровнях боковых напряжений на блоках циклического нагружения деформации растут интенсивнее, чем в условиях длительного статического нагружения. Так доля вертикальных деформаций на всех этапах приложения циклической нагрузки составила около 50 % от величины максимальных деформаций, зафиксированных при разрушении образца, а на блоках № 2 и № 3 статического нагружения – суммарная деформация менее 12 %.

Наибольшее развитие деформаций наблюдается на этапе активного статического нагружения с последующей 60-ти минутной выдержкой под статической нагрузкой



(рис. 3). Прирост вертикальных деформаций при  $\sigma_{1(1)} = 0,33$  МПа в певой серии составил 44 %, а во второй серии при  $\sigma_{1(1)} = 0,3$  МПа – 39 % от предельных значений, зафиксированных в момент разрушения образца. В этот момент происходит доуплотнение глинистого грунта нарушенной структуры, объем образца уменьшается на 10 % за счет уменьшения объема пор и пустот. Происходит формирование уплотненного ядра у каждой грани образца и возникновение локальных зон предельного равновесия (рис. 4), размеры которых не являются постоянными и увеличиваются в зависимости от вида загрузки [8]. При этом на этапе выдержки образца под статической нагрузкой скорость деформаций постепенно уменьшалась, а прирост деформаций составил до 10 %. Данный факт свидетельствует об изменении напряженно-деформированного состояния внутри образца глинистого грунта нарушенной структуры во времени и затухании деформаций ползучести вследствие недостаточности размеров уплотненных зон и значительной ширины грунтовой среды между ними.

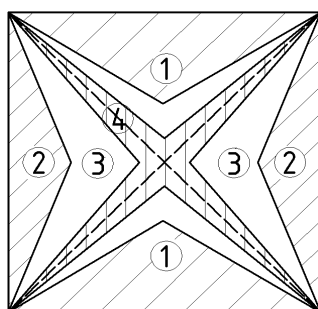


Рис. 4. Схема расположения локальных зон различной плотности в образце при трехосных испытаниях: 1 – вертикальные уплотненные пирамиды, 2 – уплотненные пирамиды у боковых граней, 3 – разуплотненная зона, 4 – зона предельного равновесия

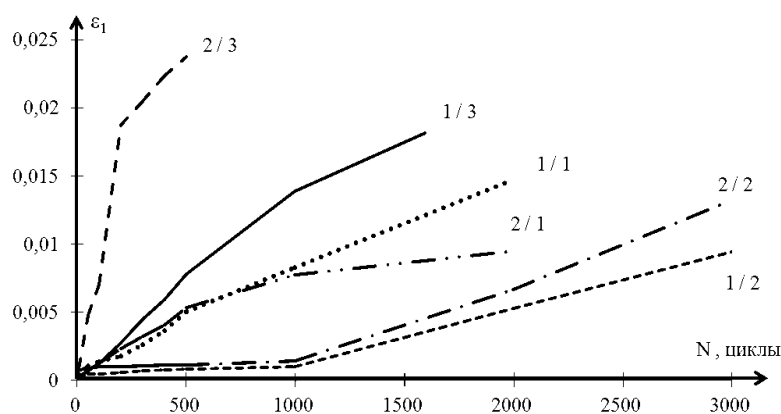


Рис. 5. График развития относительных вертикальных деформаций в пределах блока циклического нагружения:  
1/1, 1/2, 1/3 – Серия № 1 блоки № 1, № 2 и № 3 соответственно;  
2/1, 2/2, 2/3 – Серия № 2 блоки № 1, № 2 и № 3 соответственно

На этапе приложения циклического нагружения происходит постепенное накопление вертикальных и объемных деформаций. Как показано на рис. 5, в первый день приложения циклической нагрузки деформации увеличиваются при  $\Delta\sigma_{1(1)} = 0,09$  МПа на 18 %, а при  $\Delta\sigma_{1(1)} = 0,06$  МПа – на 10 %. Следует отметить, что наибольшая скорость деформирования образцов зафиксирована в течение первых пятистах циклах нагружения, а после приложения тысячного цикла деформации замедляются, а при низком значении  $\Delta\sigma_{1(1)}$  затухают. Это объясняется двумя взаимно компенсирующими явлениями, происходящими в зоне между уплотненными пирамидами

внутри образца глинистого грунта: упрочнением, обусловленным залечиванием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнением, вызванным переориентацией частиц и образованием микротрещин [10], которые при высоких значениях амплитуды цикла «схлопываются», а при низких значениях остаются неизменными. На данном этапе деформирования уплотненные пирамиды увеличиваются в объеме, а степень поврежденности микротрещинами грунта в зоне, расположенной между указанными пирамидами, существенно мала.

На этапе длительной статической нагрузки (блоки № 2 и № 3) наблюдается незначительный прирост вертикальных деформаций, но он начинается с некоторой задержкой во времени после начала данного этапа загрузки, что связано, так как в образце имеется напряжение, созданное в процессе предшествующего циклического нагружения. Учитывая, что вертикальные напряжения  $\sigma_{1(1)}$  имеют маленькие значения и не могут вызвать активизацию процесса длительной ползучести (не могут вызвать дальнейшее образование повреждений микротрещинами в зоне между уплотненными пирамидами), преобладающими на этом этапе загрузки являются процессы восстановления коагуляционных связей и происходит залечивания микротрещин, то есть упрочнение грунта [11].

На втором блоке циклического нагружения деформации выросли, в среднем, на 11 %. В процессе приложения первой тысячи циклов с амплитудой  $\Delta\sigma_{1(1)} = \Delta\sigma_{1(2)}$  деформации увеличились не более чем на 1 %, при этом в условиях аналогичного (с равными параметрами цикла) нагружения в первом блоке циклической нагрузки прирост деформаций был в 10 раз больше. Указанный факт позволяет заключить, что в интегральном объеме образца деформационные характеристики глинистого грунта нарушенной структуры увеличились по сравнению со значениями, которые были у него в начале первого блока циклической нагрузки. Это увеличение модуля деформации является результатом процессов восстановления связей и микроструктурного упрочнения глинистого грунта, которые происходили в образце на предыдущем этапе длительного статического нагружения.

Вышеизложенное свидетельствует, что учет истории предшествующего нагружения в рамках данных режимов позволит получать более экономичные проектные решения. Следует отметить, что в локальной зоне между уплотненными пирамидами в образце глинистого грунта происходит накопление дефектов и степень повреждения микротрещинами увеличивается, начинается процесс роста длины трещины [10, 11].

На третьем блоке длительной нагрузки во второй серии экспериментов ( $\sigma_{1(1)} = 0,3$  МПа) наблюдается больший прирост деформаций, чем в первой серии ( $\sigma_{1(2)} = 0,33$  МПа), и, как следствие, суммарные деформации образцов выравниваются, что свидетельствует о предельном потенциале уплотнения грунта в интегральном объеме образца. Данная особенность деформирования проявляется при комбинации режимов нагружения в условиях малых значений вертикального девиатора и больших значений боковых давлений.

На третий день в течение блока циклического нагружения вертикальные деформации образца достигли предельных значений, их прирост составил около 30 % (рис. 5). Деформирование образца происходило за счет перемещения уплотненных пирамид как жестких тел, в это же время в зоне между пирамидами началось преобладание процессов разупрочнения грунта над упрочнением, возникла прогрессирующая ползучесть и, как следствие, стадия разрушения. Следует отметить, указанные процессы разупрочнения, сопровождающиеся образованием микро и макротрещин, охватывают не весь объем грунта, а лишь зоны предельного равновесия (рис. 4).

### **Заключение**

В результате анализа данных экспериментальных исследований установлено:

1. Развитие деформаций глинистого грунта нарушенной структуры в условиях трехосного сжатия при больших уровнях боковых давлений зависит от режима нагружения, уровня средних нормальных напряжений в образце и истории предшествующего нагружения.

2. Процессы микроструктурного упрочнения грунта при малых значениях девиатора на этапах длительного статического нагружения улучшают деформационные характеристики глин в интегральном объеме образца.

3. В течение процесса режимного нагружения происходит формирование уплотненного ядра у каждой грани образца и возникновение локальных зон предельного равновесия, размеры которых не являются постоянными и увеличиваются в зависимости от вида нагружения.

4. На этапе разрушения в зонах предельного равновесия процессы разупрочнения, сопровождающиеся образованием микро и макротрещин, преобладают над процессами упрочнения, что подтверждается развитием деформаций прогрессирующей ползучести.

### Список библиографических ссылок

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : АСВ, 2014. 728 с.
2. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 4. С. 16–23.
3. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Ползучесть и виброползучесть грунтов : сб. трудов XIV междунар. симп. по реологии грунтов – Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов / КГАСУ. Казань, 2014. С. 8–23.
4. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
5. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : сб. трудов XIII междунар. симп. по реологии грунтов – Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения / КГАСУ. Казань, 2012. С. 18–26.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
7. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование массива грунта, укрепленного напорной цементацией : сб. ст. VIII междунар. научно-практич. конференции – Актуальные вопросы науки, технологии и производства / СПбГАСУ. СПб., 2015. С. 80–83.
8. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Расчетная модель длительного нелинейного деформирования глинистых грунтов при сложном напряженном состоянии // Известия КГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 121–128.
9. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Особенности деформирования глинистых грунтов при режимном нагружении // Известия КГАСУ. 2012. № 4 (22). С. 193–198.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. Iss. 1. P. 5–11.
11. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 145–152.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [mirsayapov@kgasu.ru](mailto:mirsayapov@kgasu.ru)

**Koroleva I.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [79178711218@yandex.ru](mailto:79178711218@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## Features of clay soils deformation with increasing regime loading

### Abstract

*Problem statement.* The main goal of the performed studies is to study the features of deformation of clay soil of the disturbed structure under regime cyclic loading with an increasing level of vertical load taking into account high levels of lateral stresses. To date, there are no data on the results of studies under this loading regime.

*Results.* As the main results of the research, one can note the receipt of new data on the peculiarities of the development of relative vertical deformation in dependence of different values of deviator stresses of the cycle in the samples under high levels of lateral stresses. On the basis of the performed analysis of the results of investigations, certain regularities in the behavior of clay soil samples were established under regime cyclic and long-term static triaxial loads.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the construction industry is to study the features of the deformation of clay soil samples of the damaged structure under the change in the loading regime at high lateral stress levels, as well as in determining the influence of the vertical load of the cycle on the stress-strain state of clay soil and its deformation rate. It is established that the previous loading significantly affects the rate of development of vertical deformations of the sample, that is, the deformation characteristics of the clayey soil of the disturbed structure.

**Keywords:** clay soil, regime loading, triaxial compression, structural hardening, deformations.

### References

1. Ilyichev V. A., Mangushev R. A. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. M. : ASV, 2014. 728 p.
2. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformation of the foundation with the long-term non-linear deformation of soil // *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*. 2011. № 4. P. 16–23.
3. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev Ye. S. Creep and vibrocreep of soils : Proc. XIV intern. symp. on the rheology of soils – Future directions of the theory and practice of rheology and soil mechanics / KGASU. Kazan, 2014. P. 8–23.
4. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
5. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : Proc. XIII intern. symp. on the rheology of soils – Achievements, Problems and Perspective Directions of Development for the Theory and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering Problems / KGASU. Kazan, 2012. P. 18–26.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
7. Shakirov I. F., Garifullin D. R. Investigation of the soil massif strengthened by pressure carburizing : Collection of articles VIII international. scientific and practical. conference – Actual issues of science, technology and production / SPbGASU. SPb., 2015. P. 80–83.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Designed model of long nonlinear deformation of clay soil in a complex stress state // *Izvestiya KGASU*. 2011. № 2 (16). P. 121–128.
9. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Features of deformation of clay soils during loading of regime // *Izvestiya KGASU*. 2012. № 4 (22). P. 193–198.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016. Volume 53. Issue 1. P. 5–11.
11. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Influence of the hardening process, the strength of clay soil under regime triaxial loading // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 1 (39). P. 145–152.

УДК 624.159.4

**Мирсаяпов И.Т.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

**Шараф Хани М.А.** – аспирант

E-mail: hani\_2012@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Прочность и деформации глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при блочных режимных циклических нагружениях**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Основной целью выполненных исследований является изучение параметров прочности и деформирования глинистого грунта в условиях трехосного сжатия, при блочных режимных циклических нагружениях. На сегодняшний день данные о результатах исследований при указанном режиме нагружения отсутствуют.

*Результаты.* Проведены экспериментальные исследования прочности и деформируемости глинистых грунтов трехосного сжатия  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  при блочных режимных циклических нагружениях. Отличительной особенностью экспериментальных исследований является то, что они проведены в приборах трехосного сжатия призматической формы с соотношением сторон 100×100×200 мм. Установлены закономерности изменения основных характеристик грунта при переходах на блоки высоким и низким уровнем напряжений. Получены новые данные о закономерностях деформирования глинистых грунтов при режимных блочных циклических нагружениях.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в исследовании деформаций виброползучести и изменений усталостного сопротивления разрушению глинистых грунтов при трехосном режимном блочном циклическом нагружении. Установлено, что напряженно-деформированное состояние, деформации и усталостная прочность грунтов меняются в зависимости от последовательности чередования блоков с различными значениями максимальной нагрузки цикла.

**Ключевые слова:** блочное режимное циклическое нагружение, глинистый грунт, трехосное сжатие.

#### **Введение**

В современных условиях фундаменты зданий и сооружений различного назначения и их грунтовые основания наряду со статическими подвергаются воздействию циклических нагрузок стационарного и нестационарного режима. Эти нагрузки в ряде случаев являются основными, определяющими безопасность зданий и сооружений в целом. При этом вопрос влияния циклических нагрузок нестационарного режима на поведение грунтовых оснований исследован недостаточно [2, 4, 5]. В связи с этим проведены экспериментальные исследования грунтов основания фундаментов при блочных режимах циклического нагружения. Моделирование сложного напряженно-деформированного состояния грунтов основания фундаментов производится в приборе трехосного сжатия, с учетом изменения режима циклического нагружения, напряженно-деформированного состояния в различных точках основания и физико-механических характеристик грунтов [6, 7, 8, 11].

#### **Основная часть**

Для проведения экспериментов использовали прибор трехосного сжатия призматической формы с размерами 100×100×200 мм, в котором давление передается с помощью механических рычагов. Все стенки камеры прибора являются жесткими и подвижными. Нагрузка передается через рычаг, что обеспечивает постоянство давления. Испытание проводится при различных величинах напряжения  $\sigma_m$ . При этом вертикальные  $\sigma_1$  и боковые  $\sigma_2 = \sigma_3$  напряжения ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ) прикладываются к образцу независимо [3, 5, 7]. Опыты проводились с образцами искусственно приготовленного грунта нарушенной структуры со

следующими характеристиками:  $I_p=0,17$ , относится к глине,  $\rho=1,9 \text{ г/см}^3$ ;  $W=23 \%$ ;  $W_L=38 \%$ ;  $W_p=21 \%$ ;  $I_L=0,117$  – показатель текучести характеризует грунт как полутвердую глину.

Испытания грунта при режимных блочных циклических нагружениях проводились по ниже описанной методике. Испытание образца в условиях трехосного сжатия разделяется на 4 этапа: 1 – этап всестороннего обжатия, 2 – этап девиаторного нагружения, 3 – этап циклического нагружения, 4 – этап длительной выдержки образца под нагрузкой. На начальном этапе испытания образец подвергался всестороннему обжатию при  $\sigma_m=\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ , в течение 30 минут. Затем, на втором этапе, испытания подвергались ступенчатому девиаторному нагружению. Каждая ступень нагружения выдерживалась, в течение 15 минут согласно программе нагружения. На данном этапе вертикального нагружения, когда  $\sigma_m$  достигло заданного значения, соответствующей  $\sigma_{max}$ , начинается третий этап испытания. Блочное циклическое нагружение, состоящее из нескольких повышающих и понижающих блоков нагружений. В каждом блоке прокладывается определенное количество циклов, соответствующих режимных нагружений. Четвертый этап заключается в том, что образцы выдерживаются под действием длительной статической нагрузки в течение 18-22 часов после приложения заданного количества циклов нагружений.

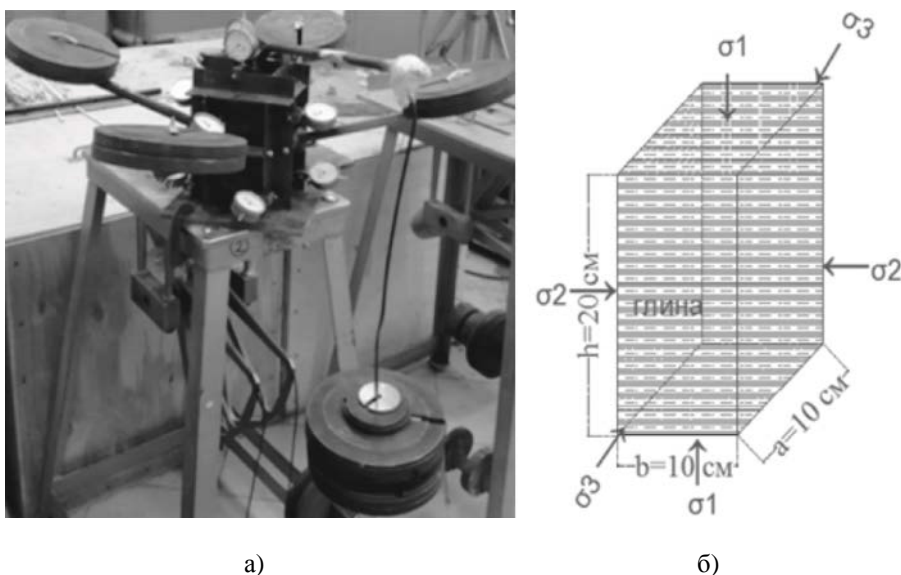


Рис. 1. Прибор трехосного сжатия: а) Общий вид прибора трехосного сжатия; б) Схема нагружения образца грунта

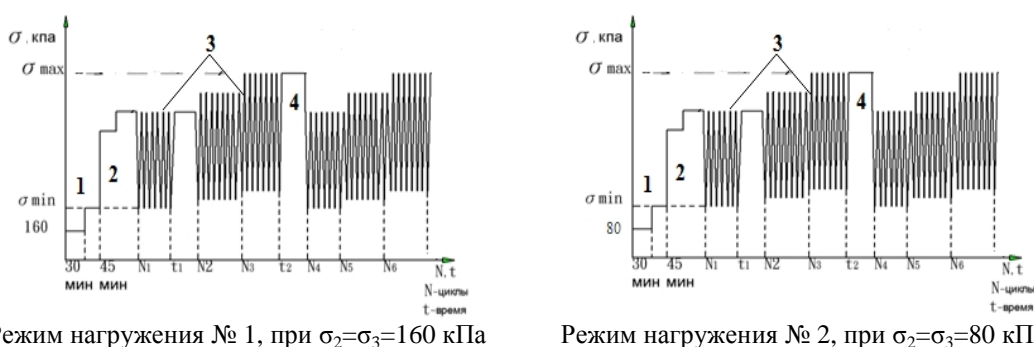
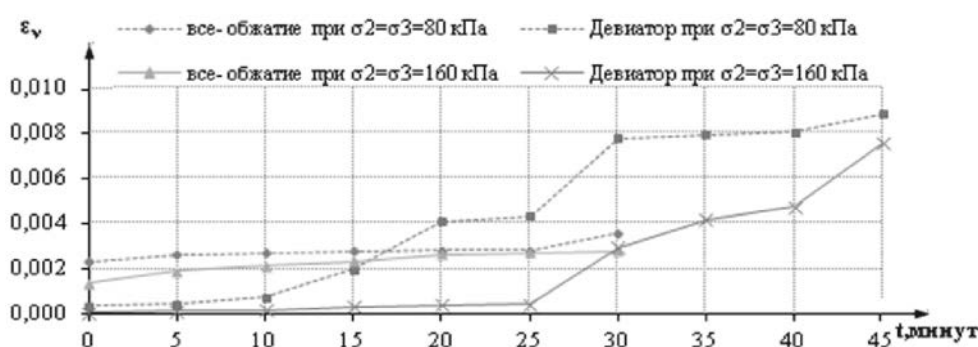
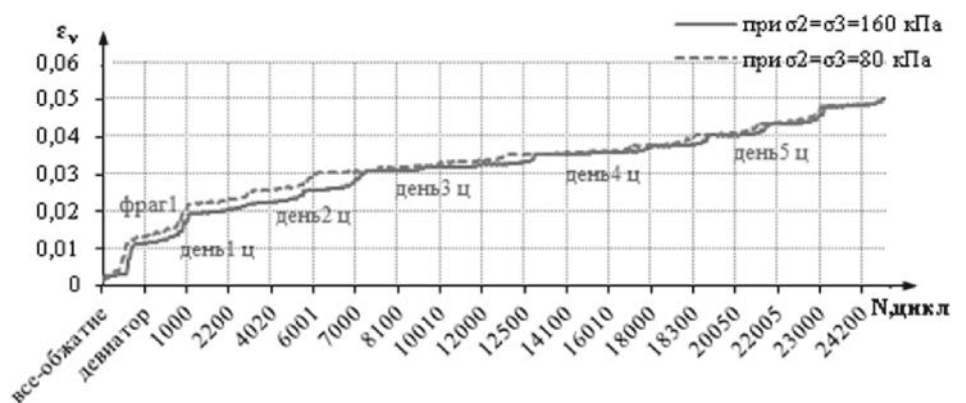


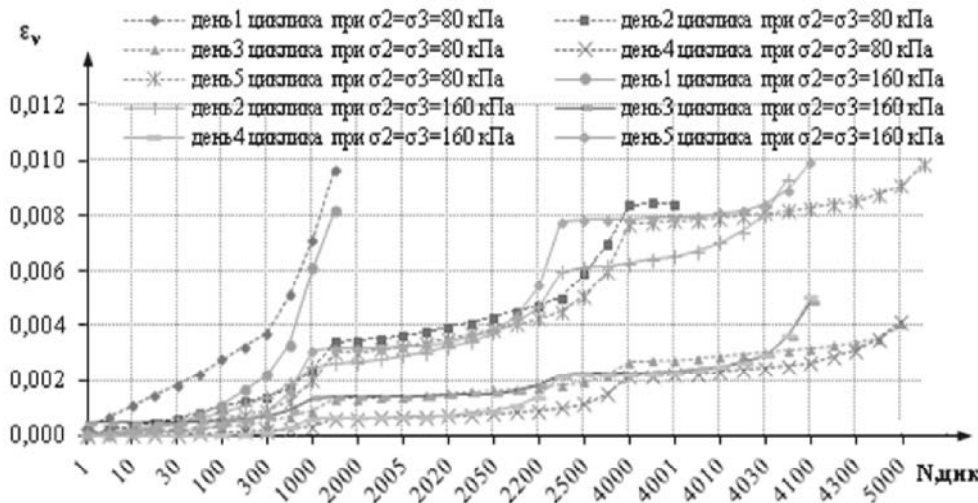
Рис. 2. Режимы нагружений: 1 – этап всестороннего обжатия; 2 – этап девиаторного нагружения; 3 – этап циклического нагружения; 4 – этап длительной выдержки под нагрузкой

В результате проведения экспериментов получены характер изменения объемных деформаций в зависимости от величины максимальных нормальных напряжений, количество циклов, время выдержки. По результатам экспериментальных исследований

построены графические зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик грунта в процессе режимного блочного циклического нагружения.



Фрагмент № 1

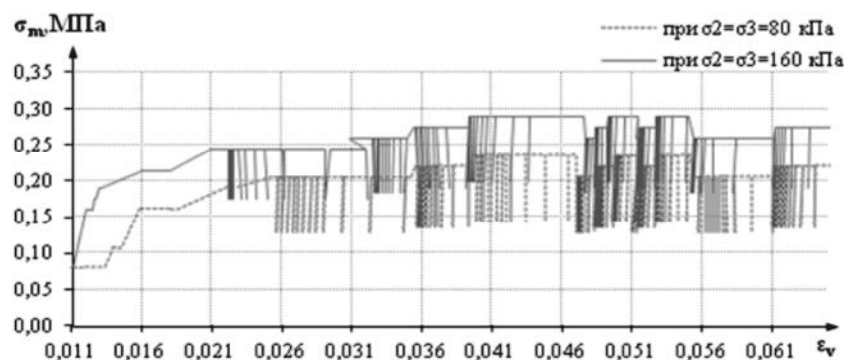


Фрагмент № 2 дней цикла

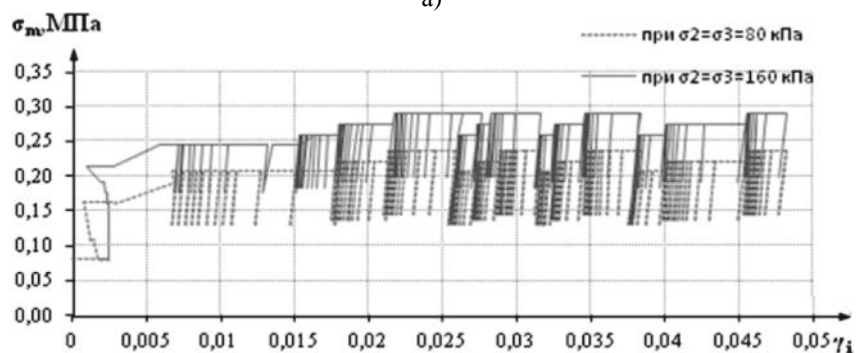
Рис. 3. Зависимость объемных деформаций от режима нагружения

Как видно из диаграммы деформирования (рис. 3-4 а, б), наблюдается увеличение объемных деформаций на всех этапах нагружений. В процессе всестороннего обжатия величина объемных деформаций увеличивались на 19,84 % при  $\sigma_m=160$  кПа и 18,51 % при  $\sigma_m=80$  кПа от общих значений деформаций. При этом величина объемных деформаций на стадии девиаторного нагружения увеличивались на 14,30 % при  $\sigma_m=160$  кПа и 17,78 % при  $\sigma_m=80$  кПа от общих величин деформаций. В проведенных режимах циклического нагружения, на стадии всестороннего обжатия, интенсивность деформаций сдвига увеличивались на 4,93 % при  $\sigma_m=160$  кПа и на 3,57 % при  $\sigma_m=80$  кПа от общих значений деформаций. В стадии девиаторного нагружения происходило увеличение

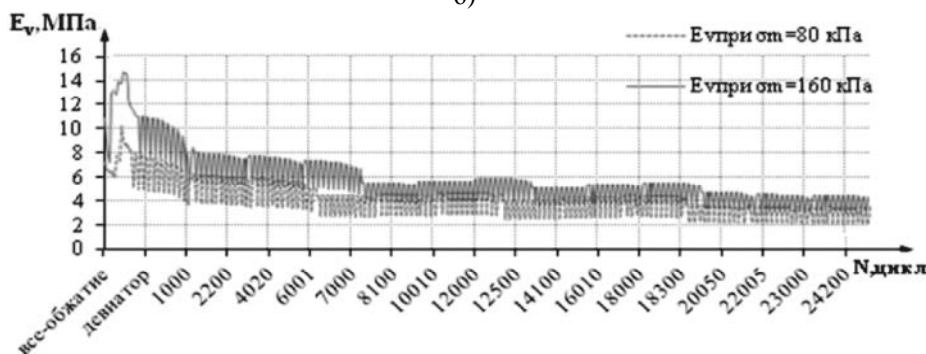
интенсивности деформаций сдвига на 9,75 % при  $\sigma_m=160$  кПа и 10,34 % при  $\sigma_m=80$  кПа от общих величин деформаций и происходило приращение деформаций сдвига, и составила 0,00097 до 0,00166 (рис. 4 а, б). При действии циклических нагрузок в пределах каждого блока нагружения происходило увеличение величины объемных деформации  $\epsilon_v$  (рис. 3-4 а, б). Деформации виброползучести (линейные и сдвиговые), с различной интенсивностью развивались на всем протяжении блочного режимного циклического нагружения, причем наиболее интенсивное развитие происходило на первом блоке нагружений до 1000 циклов, и увеличение  $\epsilon_v$  составляло 13,93 %,  $\gamma_i= 23,51$  % при  $\sigma_m=80$  кПа,  $\epsilon_v$  на 14,56 %,  $\gamma_i= 17,43$  % при  $\sigma_m=160$  кПа от общей деформации (рис. 3-4 а, б). При переходе на этап с длительно действующей статической нагрузкой (время выдержки), происходило дальнейшее нарастание деформаций на величину  $\epsilon_v =0,00005-0,0001$ . Затем, в момент изменения режима нагружения, в зависимости от последовательности чередования блоков с различной величиной максимальной нагрузки (понижающиеся и повышающиеся блоки), происходило незначительное уменьшение или увеличение полных деформаций. Изменение деформации при понижающемся блоке нагружения составляло от 0,5 % до 1 %.



а)

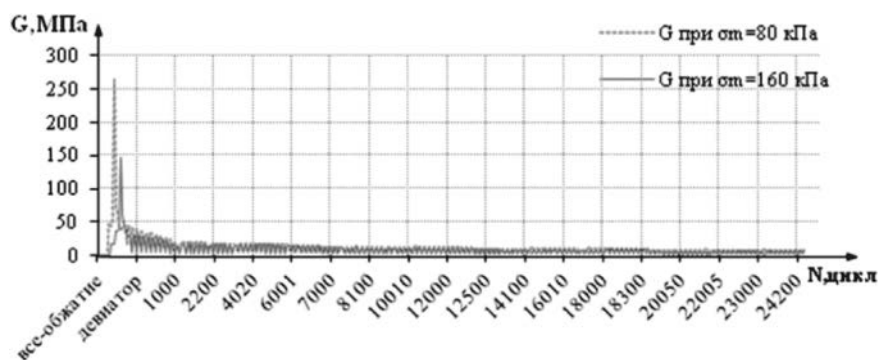


б)



в)





г)

Рис. 4. Зависимость изменения деформации и модуля деформации от режима нагружения:

- а) зависимость между объемными напряжениями  $\sigma_m$  и объемными деформациями  $\varepsilon_v$ ;
- б) зависимость средних напряжений от интенсивности деформаций сдвига;
- в) зависимость модуля объемных деформаций от режима нагружения;
- г) зависимость модуля сдвига от режима нагружения

Необходимо уточнить, что развитие общих деформаций происходит, в основном, за счет деформации виброползучести. В то же время, упругие деформации в пределах блоков нагружений практически не изменяются. Природа этого явления объясняется эффектом задержки развития микро- и макротрещин и эффектами самоупрочнения и самозалечивания глинистого грунта за счет восстановления структурных и коагуляционных связей, после перехода на следующий цикл нагружения [1, 8, 9, 10]. При режимных нагружениях происходит уменьшение модуля линейных и объемных деформаций, а так же модуля сдвига (рис. 4 в, г). Изменение модулей деформаций происходит на всем протяжении испытаний, а наибольшие изменения происходят в начальной стадии, в пределах первого блока циклического нагружения. В дальнейшем интенсивность изменения уменьшается, но полной стабилизации не происходит [7, 8].

### Заключение

Опираясь на результаты экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Развитие деформаций виброползучести и изменение усталостного сопротивления разрушению глинистых грунтов, при трехосном режимном блочном циклическом нагружении, существенно отличаются от изменения этих механических характеристик при стационарных циклических нагружениях.

2. Напряженно-деформированное состояние, деформации и модули деформации меняются в зависимости от последовательности чередования блоков с различными значениями максимальной нагрузки цикла.

3. Развитие общих деформаций грунта, при режимных блочных циклических нагружениях, происходит за счет деформаций виброползучести в зависимости от чередования блоков с различной интенсивностью в каждом блоке. Наиболее интенсивное увеличение деформаций виброползучести грунта при трехосном циклическом нагружении наблюдается на начальной стадии первого блока ( $N \approx 200$  циклов нагружений), затем происходит снижение интенсивности развития деформаций.

4. При режимных блочных циклических нагружениях происходит снижение модулей линейных сдвиговых и объемных деформаций, особенно в начальной стадии нагружения ( $N \approx 200$  циклов нагружений), после 200 циклов нагружений интенсивность снижения модулей деформаций уменьшается, но полная стабилизация параметров деформируемости не происходит.

### Список библиографических ссылок

1. Месчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. М. : Недра, 1985. 342 с.

2. Hoe I. L., luigi C., Junichi K. Soil stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis, a collection of papers of the geotechnical symposium in Rome, March 16-17. 2006. 979 p.
3. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Деформации глинистых грунтов при трехосном режимном длительном нагружении // Известия КГАСУ. 2009. № 2 (12). С. 167–172.
4. Juneja A., Raghunandan M. E. Behavior of soil under cyclic loading // Indian geotechnical conference. 2010. December 16-18. P. 195–198.
5. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В., Сабирзянов Д. Д. Прочность и деформации глинистых грунтов при трехосном режимном чередующемся статическом и циклическом нагружении : сб. трудов международной научно-технической конференции – Геотехника Беларуси: наука и практика / БНТУ. Минск, 2013. С. 23–25.
6. Jitender Dhaka, Ramesh. Experimental study of stabilization of clay soil // International journal of technical research (ijtr). 2016. Vol. 5, Iss. 2. P. 122–125.
7. Мирсаяпов И. Т., Шараф Хани М. Прочность и деформации глинистых грунтов при трехосном режимном циклическом нагружении : сб. трудов VIII Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов – Современные технологии в строительстве. Теория и практика / ПНИПУ. Пермь, 2016. С. 8.
8. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при различных режимных трёхосного нагружения с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и техника грунтов. Научно-технический журнал. 2016. № 1. С. 5–10.
9. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 145–152.
10. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Экспериментальные исследования деформирования глинистых грунтов при режимном длительно-статическом нагружении // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (40). С. 146–152.
11. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование массива грунта, укрепленного напорной цементацией : сб. ст. VIII междунар. научно-практич. конференции – Актуальные вопросы науки, технологии и производства / СПбГАСУ. СПб., 2015. С. 80–83.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)

**Sharaf Hani M.A.** – post-graduate student

E-mail: [hani\\_2012@mail.ru](mailto:hani_2012@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st.1

### **Strength and deformation of clay soils in the conditions of the triaxial compression under block regime cyclic loading**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The main goal of the performed studies is to study the parameters of strength and deformation of clay soil under conditions of triaxial compression under block regime cyclic loading. To date, there is no data on the results of studies under this loading regime.

*Results.* Experimental studies of the strength and deformability of clay soils of a triaxial compression  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$  under block regime cyclic loading are carried out. A distinctive feature of experimental studies is that they are performed in three-axis prismatic compression devices with a 100×100×200 mm aspect ratio. Regularities of changes in the main soil characteristics during transitions to blocks of high and low stress levels have been established. New data are obtained on the regularities of deformation of clay soils under regime block cyclic loading.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is to investigate the deformations of vibration creep and the changes in fatigue resistance to the destruction of clay soils under triaxial regime block cyclic loading. It is established that the stress-strain state, deformations and fatigue strength of soils vary depending on the sequence of alternation of blocks with different values of the maximum load of the cycle.

**Keywords:** block regime cyclic loading, clay soil, triaxial compression.

### References

1. Meschyan S. R. Experimental rheology of clay soils. M. : Nedra, 1985. 342 p.
2. Hoe I. L., Luigi C., Junichi K. Soil stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis, a collection of papers of the geotechnical symposium in Rome, March 16-17. 2006. 979 p.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Deformations of clay soils under triaxial regime continuous loading // *Izvestiya KGASU*. 2009. № 2 (12). P. 167–172.
4. Juneja A., Raghunandan M. E. Behavior of soil under cyclic loading // *Indian geotechnical conference*. 2010. December 16-18. P. 195–198.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Strength and deformation of clayey soils under triaxial regime alternating static and cyclic loading: dig. of art. of the international scientific and technical conference – Geotechnics of Belarus: science and practice / BNTU. Minsk, 2013. P. 23-25.
6. Jitender Dhaka, Ramesh. Experimental study of stabilization of clay soil // *International journal of technical research*. 2016. Vol. 5, Iss. 2. P. 122–125.
7. Mirsayapov I. T., Sharaf Khani M. Strength and deformation of clayey soils under triaxial regime cyclic loading: dig. of art. of the VIII All-Russian youth conference of PhD students, young scientists and students – Modern technologies in construction. Theory and practice / PNIPU. Perm, 2016. P. 8.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soils at various triaxial modal loading with accounting crack formation // *Osnovaniya, fundamenty i tekhnika gruntov. Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. 2016. № 1. P. 5–10.
9. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Influence of the hardening process on the strength of clay soil under regime triaxial loading // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 1 (39). P. 145–152.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental studies of deformation of clay soils under regime-long-static loading // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 2 (40). P. 146–152.
11. Shakirov I. F., Garifullin D. R. Investigation of the soil massif strengthened by pressure carburizing : dig. of art. of the VIII international scientific and practical. Conference – Actual issues of science, technology and production / SPbGASU. SPb., 2015. P. 80–83.

УДК 624.153.6

**Сиразиев Л.Ф.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [siraziev100@mail.ru](mailto:siraziev100@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтового основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить влияние водонасыщенного слоя грунта на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания модели плитного фундамента.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в получении картины деформирования слоистого грунтового основания при наличии водонасыщенного слоя, подстилаемого водоупорным слоем. Получены эпюры распределения сжимающих напряжений в горизонтальной плоскости отдельно в каждом слое многослойного основания, а также в вертикальной плоскости по глубине. Определено направление вертикальной фильтрации воды в слоистом основании.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной области состоит в установлении влияния водонасыщенных слоев слоистого основания на неоднородное напряженно-деформированное состояние, которое изменяется во всем объеме в процессе нагружения. Поровая жидкость влияет на напряженно-деформированное состояние всего многослойного основания, включая вышележащие слои грунта, повышает в них капиллярное давление, вызывает горизонтальную и вертикальную фильтрацию.

**Ключевые слова:** плитный фундамент, слоистое водонасыщенное грунтовое основание, напряженно-деформированное состояние.

#### **Введение**

Из-за большого количества затрагиваемых проблем тема совместной работы плитных фундаментов и слоистых оснований привлекает большое внимание специалистов. Причем грунтовое слоистое основание, а в частности и с водонасыщенным слоем, часто является недооцененным. Напряженно-деформированное состояние слоистого основания качественно и количественно влияет на физические процессы его деформирования, и зависит от физико-механических характеристик [1-11]. Основное направление исследований – теоретический прогноз поведения грунтового основания под влиянием внешних и внутренних воздействий: нагрузки от здания, распределения напряжений в неоднородной грунтовой толще, влияние водонасыщенных слоев и т.п. Необходимо также выяснить направление и интенсивность горизонтальной и вертикальной фильтрации поровой воды в процессе деформирования слоистого массива грунта.

С целью получения сведений о напряженно-деформированном состоянии в неоднородных грунтовых массивах в лаборатории «Механики грунтов» кафедры Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии КГАСУ были проведены экспериментальные исследования трехслойного водонасыщенного грунтового основания модели плитного фундамента.

#### **Экспериментальные исследования**

Модель исследуемого слоистого грунтового основания сформирована в объемном металлическом лотке с размерами  $1 \times 1 \times 1$  м (рис. 1), [3-4], и представляет собой три слоя грунта с различными физико-механическими характеристиками, причем один из слоев является водонасыщенным.

Трехслойное грунтовое основание во всех четырех экспериментах состояло из следующих грунтов (мощность каждого 20 см, кроме эксперимента № 3):

– супесь пластичная непросадочная ( $W=14$  %,  $\rho=1,82$  г/см<sup>3</sup>,  $I_L=0,4$ ,  $E=7-11$  МПа,  $\varphi=13^\circ$ ,  $c=3$  кПа);

– суглинок тугопластичный непросадочный ( $W=19\%$ ,  $\rho=1,68 \text{ г/см}^3$ ,  $I_L=0,4$ ,  $E=31 \text{ МПа}$ ,  $\varphi=18^\circ$ ,  $c=15 \text{ кПа}$ );

– мелкий водонасыщенный песок средней плотности ( $W=19\%$ ,  $\rho=1,72 \text{ г/см}^3$ ,  $S_R=0,83$ ,  $E=11 \text{ МПа}$ ,  $\varphi=19^\circ$ ,  $c=3 \text{ кПа}$ ).

В качестве подстилающего слоя ИГЭ-4 под исследуемым основанием во всех экспериментах был использован суглинок полутвердый непросадочный ( $W=19\%$ ,  $\rho=2,01 \text{ г/см}^3$ ,  $I_L=0,15$ ,  $E=33 \text{ МПа}$ ,  $\varphi=23^\circ$ ,  $c=28 \text{ кПа}$ ).

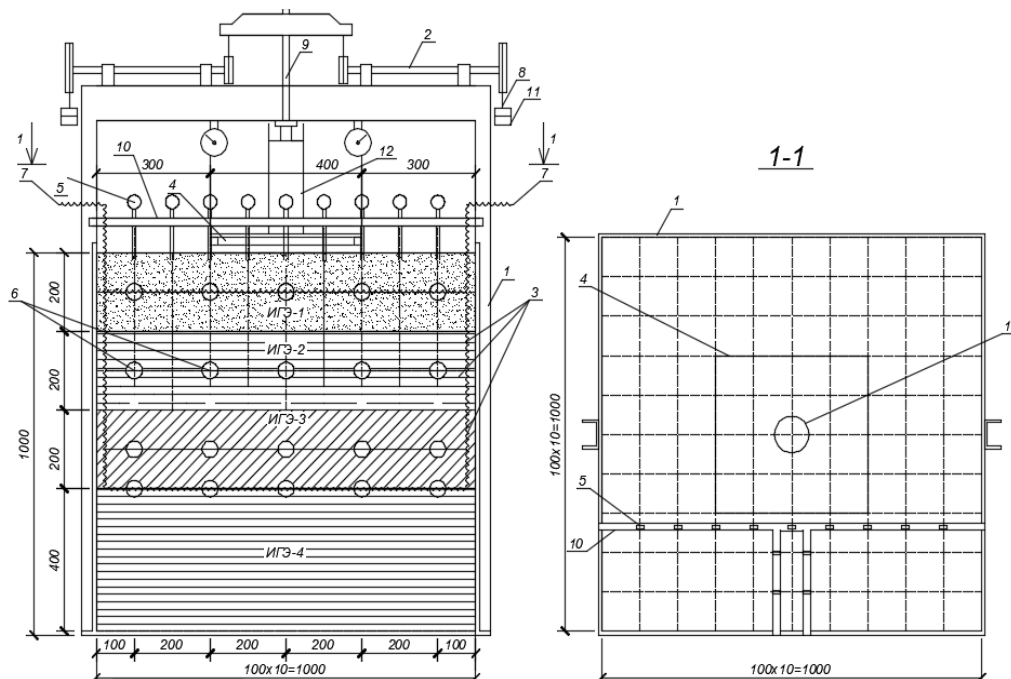


Рис. 1. Схема испытания и расположения приборов:

- 1 – объемный лоток; 2 – загрузочное устройство; 3 – слоистое грунтовое основание;  
 4 – модель плитного фундамента; 5 – индикаторы часового типа; 6 – грунтовые датчики;  
 7 – проводка датчиков; 8 – подвес нагружающего устройства; 9 – упорная конструкция;  
 10 – траверса индикаторов часового типа; 11 – грузы; 12 – домкрат

Были проведены четыре эксперимента моделей трехслойного грунтового основания с малосжимаемым подстилающим слоем:

- 1-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная; песок мелкий водонасыщенный средней плотности; суглинок тугопластичный непросадочный.

- 2-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная; суглинок тугопластичный непросадочный; песок мелкий водонасыщенный средней плотности.

- 3-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная (мощность 30 см); суглинок тугопластичный непросадочный (10 см); песок мелкий водонасыщенный средней плотности (20 см).

- 4-й эксперимент: суглинок тугопластичный непросадочный; супесь пластичная непросадочная; песок мелкий водонасыщенный средней плотности.

Грунт в объемные лотки укладывался слоями по 5 см, уплотнялся трамбовкой до заданного значения плотности. После формирования всего трехслойного основания в середине лотка устанавливалась модель плитного фундамента – штамп в виде железобетонной плиты с размерами в плане  $0,4 \times 0,4 \text{ м}$  и толщиной 4 см. Нагружение осуществлялось ступенями с помощью гидравлического домкрата с шагом 250 кг до предельной нагрузки 1750 кг. В середине каждого слоя устанавливались грунтовые датчики в цепочку под центром плитного фундамента, под краем плиты и за пределами (рис. 1). По показаниям датчиков определялись относительные деформации в слоях исследуемого массива, а также в процессе измерялась осадка модели плитного фундамента и осадка каждого слоя.

В результате анализа форм деформирования слоистых оснований (рис. 2-3) можно заметить, что в первых трех экспериментах наибольшие осадки слоев происходили над водонасыщенным слоем песка, и составляли от 30 до 50 мм, что несколько больше, чем в других исследованиях слоистых оснований без водонасыщенного слоя [3-4]. Это указывает на интенсивный процесс уплотнения водонасыщенного слоя в результате процессов кратковременной консолидации. В эксперименте № 4 наибольшая осадка наблюдалась в подстилающем слое фундамента – тугопластичного суглинка (рис. 2), что связано с податливостью и большой деформативностью нижележащих слоев. Наибольшая осадка модели плитного фундамента наблюдалась в эксперименте № 3 (110 мм), что связано с небольшим модулем деформаций подстилающего слоя супеси ( $E = 7$  МПа).

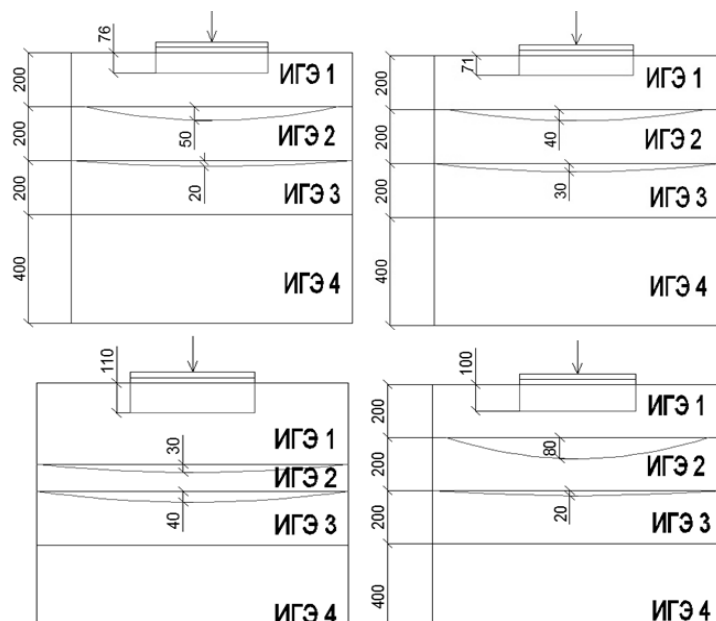


Рис. 2. Форма деформирования слоистого грунтового основания

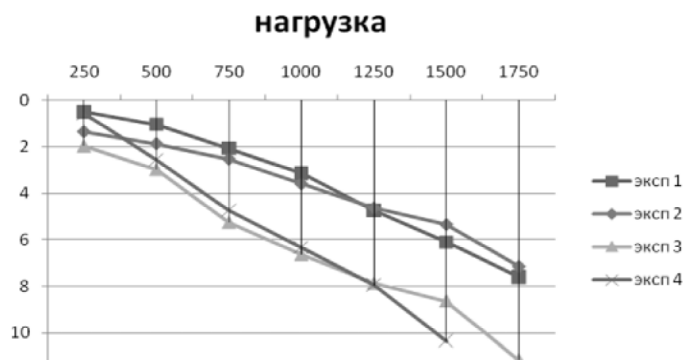


Рис. 3. График зависимости осадки плитного фундамента от нагрузки

Из горизонтальных эпюр распределения напряжений в экспериментах № 1-3 (рис. 4-5) видно, что в верхних слоях слоистого основания (подстилающим слоем является пластичная супесь) эпюры имеют седлообразную классическую форму с максимальными значениями под краями модели плитного фундамента, особенно на ранних стадиях нагружения, а на последних стадиях напряжения выравниваются, и приобретают параболическую форму. В эксперименте № 4, где верхним слоем является суглинок, горизонтальная эпюра наоборот сначала имеет параболическую форму с максимумом (60 кПа) под центром штампа, а затем седлообразную с уменьшением напряжения под центром до 10 кПа.

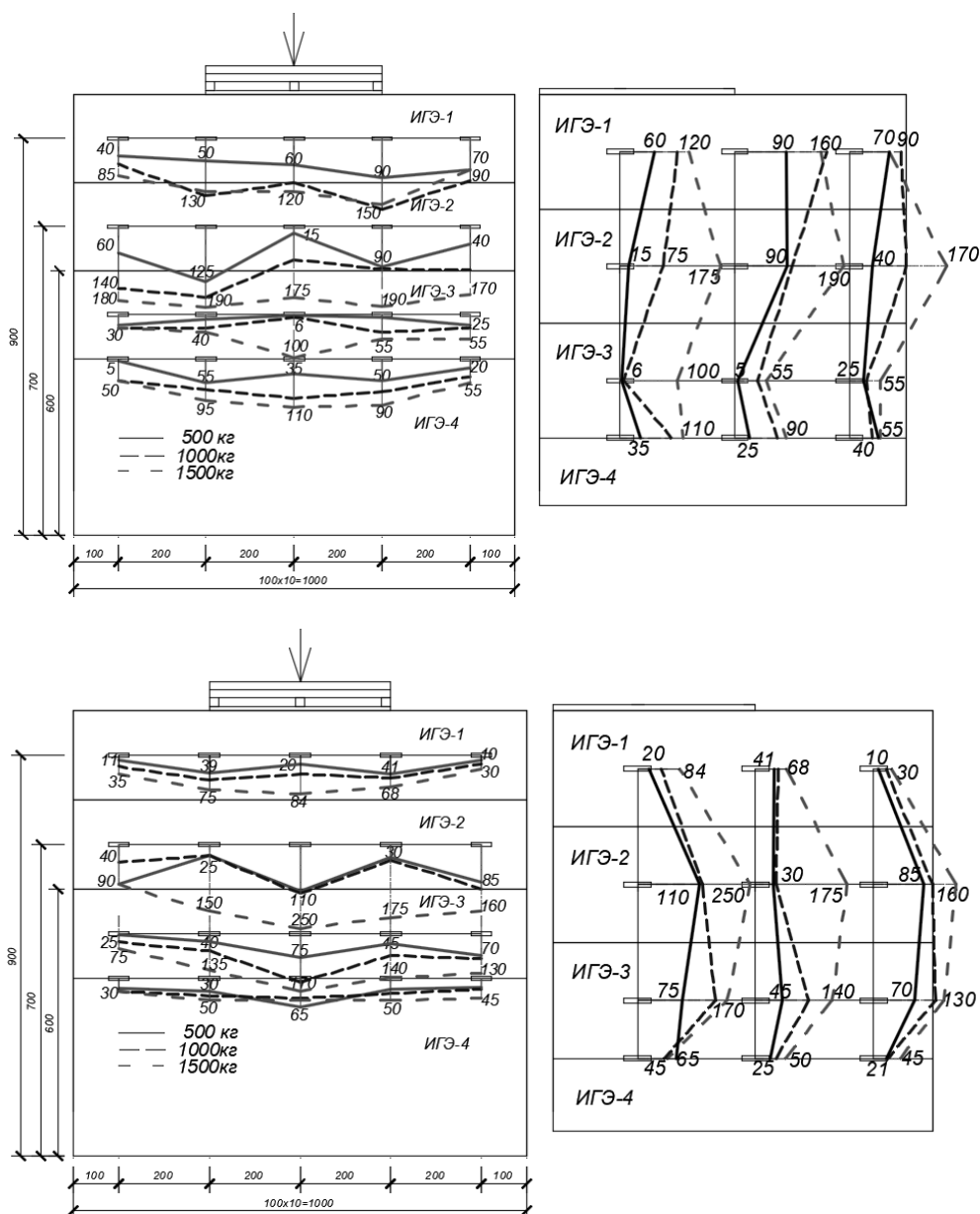


Рис. 4. Эпюры напряжений по горизонтали и вертикали в слоях грунта слоистого основания в экспериментах № 1 и № 2

По вертикальным эпюрам распределения напряжений эксперимента № 1 (рис. 4) видно, что на первых стадиях нагружения наибольшие напряжения возникали в первом верхнем слое, а по мере его уплотнения и увеличения нагрузки напряжения во втором водонасыщенном слое песка увеличились в 2-10 раз до 170-190 кПа. Во втором эксперименте (рис. 4), где водонасыщенный слой являлся третьим сверху, наибольшие напряжения на ранних стадиях возникали во втором слое (суглинок), и с увеличением нагрузки напряжения в водонасыщенном слое увеличились в 2-3 раза до 130-170 кПа.

В эксперименте № 3 (рис. 5), который отличается от № 2 толщинами первого и второго слоев, на ранних стадиях нагружения большие напряжения возникали в первом слое, особенно, под краями плиты (75 кПа), а во втором слое напряжения в несколько раз меньше. С увеличением нагрузки напряжения в первом слое под краями плиты уменьшились на 65 %, под центром плиты увеличились в 4 раза, в ИГЭ-2 напряжения увеличились 2-8 раз, а в третьем водонасыщенном слое напряжения увеличились в 2-5,6 раз.

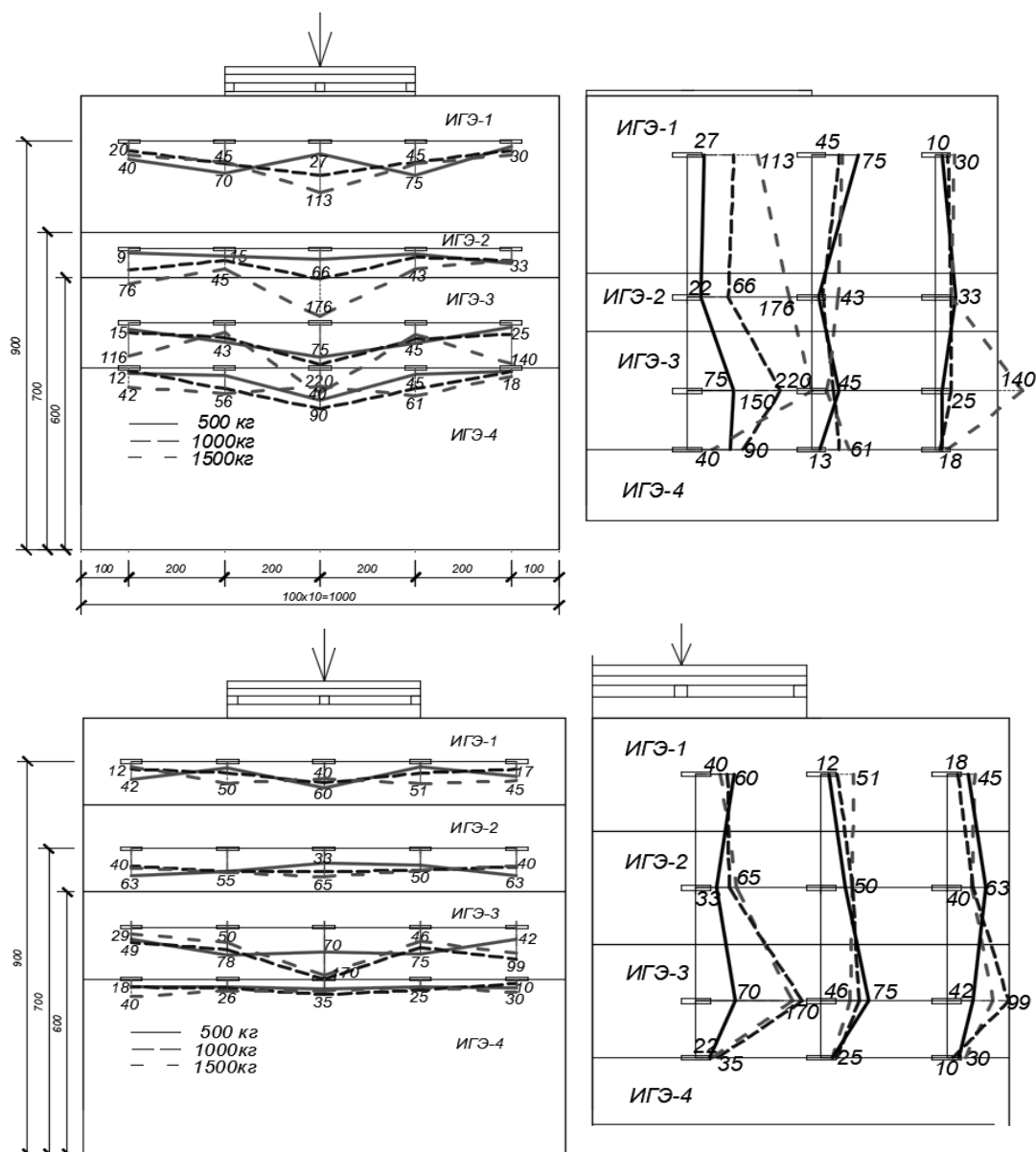


Рис. 5. Эпюры напряжений по горизонтали и вертикали в слоях грунта слоистого основания в экспериментах № 3 и № 4

В эксперименте № 4 (рис. 5) в ИГЭ-1 (тугопластичный суглинок) напряжения под центром плиты и за ее пределами на первых этапах нагружения достигли 45-60 кПа, а затем с увеличением нагрузки они уменьшились 2-6 раз. В ИГЭ-2 (супесь) напряжения увеличились в 1,5-2 раза. В ИГЭ-3 (водонасыщенный песок) под центром плиты и за ее пределами напряжения были соответственно 132 кПа и 42 кПа, на последней стадии нагружения они увеличились в 1,3 и 2 раза до 170 кПа и 99 кПа. В том же слое, но под краями плиты напряжения были максимальными 75 кПа на первых этапах, а затем они уменьшились до 46 кПа.

Сжимающие напряжения в слоях грунта, полученные экспериментальным путем, отличаются от классической формы распределения, принятой для однородных грунтов (рис. 6), они распределяются неравномерно в зависимости от деформативных свойств грунтов, концентрируются в слабых и водонасыщенных грунтах. Поэтому осадка и деформации в слоистых основаниях значительно больше, чем в однородных грунтах. В экспериментах № 1, № 2 и № 3 в отличие от классической формы распределения на конечных этапах нагружения напряжения во втором слое больше, чем в первом слабом слое, так как им является супесь пластичная, а вторым слоем является прочный тугопластичный суглинок или водонасыщенный слой песка. В эксперименте № 4



верхним слоем является прочный суглинок, вторым супесь, и поэтому напряжения в этих слоях в 2-4 раза меньше, чем в других экспериментах, сравнимы с классическими, но третий слой – водонасыщенный и в нем происходит значительное увеличение напряжений, что не соответствует классике.

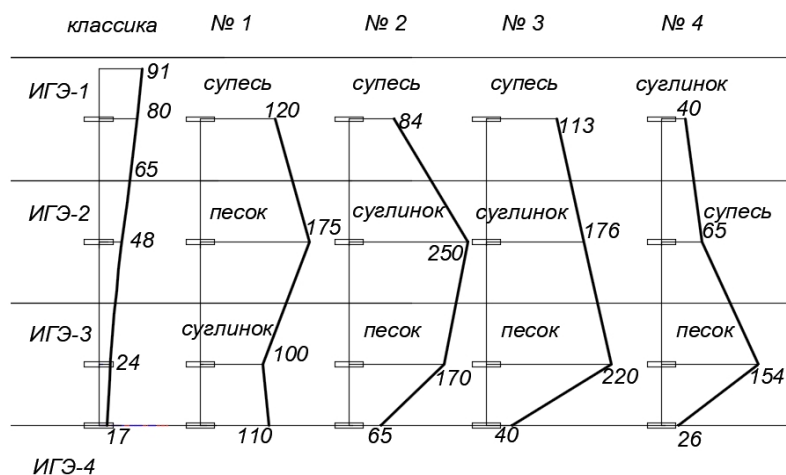


Рис. 6. Эпюры распределения сжимающих напряжений по глубине по центру штампа: классика – в однородном массиве грунта, № 1-4 – в экспериментах

Таким образом, в слоистом основании в зависимости от места расположения происходит значительное изменение напряжений: под центром штампа, под его краем или за пределами в процессе нагружения может происходить увеличение напряжений или их уменьшение. Разница в напряжениях между отдельными слоями обуславливается различием в деформативных характеристиках грунтов в 3-4 раза, а также зависит от верхнего подстилающего слоя: если им является относительно слабый грунт (супесь пластичная  $E=7-11$  МПа), то пластические зоны, возникающие под краями штампа уже на ранних стадиях, расширяются, «передают» свои напряжения в соседние с ними области, влияют на распределение напряжений под центром штампа, за его пределами, в нижних слоях, и поэтому напряжения оказываются уже не пропорциональными величине внешней нагрузки. Полные напряжения в водонасыщенных слоях на начальных стадиях нагружения в 3-10 раз меньше, чем на завершающих этапах. Это связано с тем, что нагрузка передаваемая вышележащими слоями грунта, воспринимается сначала поровой несжимаемой водой (так как песок не обладает значительной структурной прочностью), а затем постепенно передается на скелет грунта.

В результате анализа напряженно-деформированного состояния слоистого основания с водонасыщенным слоем песчаного грунта можно заключить, что наличие водонасыщенного слоя в пределах сжимаемой толщи значительно влияет на перераспределение напряжений в грунтовом основании: в процессе нагружения и деформирования в водонасыщенном слое наблюдается увеличение напряжений по отношению к вышележащим слоям в среднем на 1,2-2,5 раза, в вышележащих слоях увеличение напряжений происходит меньше, а в некоторых случаях наблюдается уменьшение напряжений. Это связано с процессами уплотнения грунта в результате фильтрации поровой воды и со сдвиговыми процессами между отдельными слоями слоистого основания.

Для наблюдения за процессом кратковременной фильтрации поровой воды в грунтовом основании в каждом слое в разных точках по глубине и по горизонтали производился отбор проб грунта для определения изменения влажности в ходе нагружения. Из рис. 7 видно, что в процессе проведения экспериментов происходило уменьшение влажности водонасыщенного слоя песка с 19 % до 16 % в эксперименте № 2 и до 13 % в эксперименте № 4, причем уменьшение влажности за пределами штампа происходило менее интенсивно до 17 % и 14 % соответственно. В грунтах, расположенных выше водонасыщенного слоя, в эксперименте № 2 влажность тугопластичного суглинка увеличилась в пределах модели плиты на 1-2 % до 21 %, в

эксперименте № 4 в пластичной супеси влажность увеличилась на 2-3 % до 16-17 %. Таким образом, движение поровой воды из водонасыщенного слоя мелкого песка, подстилаемого водоупорным слоем (полутвердый суглинок) происходит в верхние слои за счет предположительно повышения капиллярного давления в порах грунтов под моделью плитного фундамента, а также в стороны от центра оси нагружения. Судя по изменению влажности в ходе эксперимента за пределами модели плиты (рис. 7) горизонтальная фильтрация происходит меньше в 1,5 раза, т.к. в направлении от центра количественное изменение влажности уменьшается.

Эксперимент 2				Эксперимент 4			
ИГЭ-1 супесь				ИГЭ-1 суглинок			
	+1%	+1%	+0.5%	+1%	+1%	+1%	
ИГЭ-2 суглинок	+2%	+2%	+1%	+3%	+2.5%	+2%	
	-5%	-4.5%	-3%	-6%	-6%	-5.5%	
ИГЭ-3 песок насыщенный водой	-3%	-3%	-2%	-5%	-5%	-4.5%	
	-1%	-1%	-0.5%	-2%	-1.5%	-1.5%	
ИГЭ-4				-1%	-1%	-0.5%	
ИГЭ-4				ИГЭ-4			

Рис. 7. Схема мест отбора проб грунта для определения влажности с указанием изменения влажности в ходе экспериментов № 2 и № 4

### Заключение

Процесс деформирования слоистого основания модели плитного фундамента сопровождается перераспределением напряжений между слоями основания, возникновением сил взаимодействия между скелетом грунта и поровой водой в виде объемных сил, которые определяются возникающими давлениями в поровой жидкости. Поровая вода влияет на напряженно-деформированное состояние всего многослойного основания, включая вышележащие слои грунта, повышает в них капиллярное давление.

В слоистых водонасыщенных грунтовых основаниях формируется сложное и неоднородное напряженно-деформированное состояние, которое изменяется во всем объеме в процессе нагружения вследствие процессов кратковременной консолидации.

В результате деформирования слоистого основания происходит вертикальная фильтрация поровой воды в верхние слои, расположенные над водонасыщенным слоем, а также в стороны по горизонтали.

### Список библиографических ссылок

1. Тетиор А. Н. Фундаменты. М. : Академия, 2010. 400 с.
2. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981. 318 с.
3. Сиразиев Л. Ф., Богданов Р. Р. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния двухслойного грунтового основания плитного фундамента при жестком подстилающем слое // Известия КГАСУ. 2012. № 1 (19). С. 67–73.
4. Сиразиев Л. Ф., Сергеев Д. Н. Экспериментальные исследования влияния напластования различных грунтов на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 153–159.

5. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Физико-механические свойства глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 82–87.
6. Тезисы докладов : сб. научных трудов 66-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2014. 346 с.
7. Тезисы докладов : сб. научных трудов 67-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2015. 349 с.
8. Андреев В. И., Барменкова Е. В. Расчет двухслойной плиты на упругом основании с учетом собственного веса : сб. трудов XIX Польско-словацко-российского семинара «Теоретические основы строительства» / University of Zilina. Жилина, 2010. С. 39–44.
9. Kim C. K., Hwang M. H. Non-linear analysis of skew thin plate by finite difference method // Journal of mechanical science and technology. 2012. Vol. 26. № 4. P. 1127–1132.
10. Malekzadeh K., Khalili S. M. R., Abbaspour P. Vibration of non-ideal simply supported laminated plate on an elastic foundation subjected to in-plane stresses // Composite Structures, 2010. P. 1478–1484.
11. Kotrasova K., Kormanikova E. The ground plate on the Winkler foundation In // Modelovani v mechanice. 2010. № 92. P. 1–6.

**Siraziev L.F.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [siraziev100@mail.ru](mailto:siraziev100@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Experimental studies of the stress-strain state of the three-layer soil base under short-term plate-bearing test and the presence of the water saturated layer**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to reveal the effect of water saturated layer to stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation.

*Result.* The main results of the study consist in obtaining a picture of deformation for layered subsoil base in the presence of water saturated layer with an underlain by a waterproof layer. Compressive stress distribution diagrams in the horizontal plane of each layer of layered subsoil base and in the vertical plane in depth are obtained. Direction of a vertical filtration water in the subsoil base are determined.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction area is to establish the influence water saturated layers on inhomogeneous stress-strain state that changing in the all of volume in the process of loading. Pore water influences to stress-strain state all of multilayered base including overlying layers of the soil, increases capillary pressure, causes deformation of form change.

**Keywords:** slab foundation, water saturated subsoil bas, stress-strain state.

#### **References**

1. Tetior A. N. Foundations. M. : Academy, 2010. 400 p.
2. Tsytoovich N. A., Ter-Martirosyan Z. G. Fundamental of applied geomechanics in construction. M. : Higher School, 1981. 318 p.
3. Siraziev L. F., Bogdanov R. R. Experimental researches of deflected mode of double layered soil basis of slab foundation with rigid underlay // Izvestiya KGASU. 2012. № 1 (19). P. 67–73.
4. Siraziev L. F., Sergeev D. N. Experimental studies of the influence of the bedding of various soil on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation // Izvestiya KGASU. 2017. № 2 (40). P. 153–159.

5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Physical and mechanical properties of clay soils with prolonged triaxial compression // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2011. № 1 (26). P. 82–87.
6. Theses of reports : dig. of art. of the 66<sup>th</sup> All-Russian scientific conference, Kazan, 2014. 346 p.
7. Theses of reports : dig. of art. of the 67<sup>th</sup> All-Russian scientific conference, Kazan, 2015. 349 p.
8. Andreev V. I., Barmenkova E. V. Calculation of a two-layer slab on an elastic foundation with allowance for its own weight: dig. of art. of the XIX Polish-Slovak-Russian seminar «Theoretical basis of construction» / University of Zilina. Zilina, 2010. P. 39–44.
9. Kim C. K., Hwang M. H. Non-linear analysis of skew thin plate by finite difference method // Journal of mechanical science and technology. 2012. Vol. 26. № 4. P. 1127–1132.
10. Malekzadeh K., Khalili S. M. R., Abbaspour P. Vibration of non-ideal simply supported laminated plate on an elastic foundation subjected to in-plane stresses // Composite Structures, 2010. P. 1478–1484.
11. Kotrasova K., Kormanikova E. The ground plate on the Winkler foundation In // Modelovani v mechanice. 2010. № 92. P. 1–6.



УДК 532.5:621.694

**Багоутдинова А.Г.** – кандидат технических наук

E-mail: [bagoutdinova@rambler.ru](mailto:bagoutdinova@rambler.ru)

**Казанский (Приволжский) федеральный университет**

Адрес организации: 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

**Вачагина Е.К.** – доктор технических наук

E-mail: [vachagina@mail.ru](mailto:vachagina@mail.ru)

**Казанский Научный Центр Российской Академии Наук**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/3

**Золотоносов Я.Д.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [zolotonosov@mail.ru](mailto:zolotonosov@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## Математическое моделирование труб с винтовой поверхностью теплообмена

### Аннотация

*Постановка задачи.* Для повышения теплогидродинамической эффективности трубчатых аппаратов необходимо разрабатывать новые конструкции теплообменных элементов, отличающихся высокой тепловой эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью производства.

В связи с этим, авторами предложена серия винтовых труб с высокой степенью развития поверхностей теплообмена.

*Результаты.* В работе построены математические модели труб с винтовой поверхностью теплообмена различных конфигураций. Параметры, входящие в математические модели, позволяют исследовать и в дальнейшем оптимизировать внутреннюю геометрию труб.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной области состоит в том, что предлагаемые теплообменные элементы устанавливаются в инновационных теплообменных аппаратах, монтируемых в индивидуальных тепловых пунктах. Кроме того, строгое математическое описание труб с винтовой поверхностью теплообмена позволит при производстве предлагаемых теплообменных элементов использовать современные компьютерные технологии.

**Ключевые слова:** моделирование, винтовая поверхность, винтовая линия, гидромеханика, теплообменный аппарат.

Важным направлением решения задач ресурсо- и энергосбережения является разработка и внедрение новых видов конвективных поверхностей теплообмена, отличающихся высокой тепловой эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью производства.

В различных видах промышленности и ЖКХ одним из важнейших видов технологического оборудования являются теплообменные аппараты конвективного типа, общая масса которых достигает до 40 % массы всего оборудования. Модернизация, ремонт такого оборудования и создание новых производственных мощностей требуют огромных капитальных вложений, поэтому внедрение более эффективных и дешевых теплообменных устройств с учетом их доли в общей массе оборудования приводит к существенной экономии материальных и энергетических ресурсов.

В связи с этим, авторами [1-6] предложена серия инновационных теплообменных элементов с винтовой поверхностью теплообмена. На рис. 1 представлен один из вариантов такого элемента.

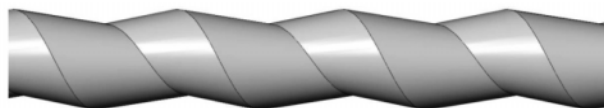


Рис. 1. Труба с винтовой поверхностью теплообмена

В работе [7] приведена оценка степени развития поверхности  $\psi$  предлагаемых теплообменных элементов по сравнению с поверхностью гладкотрубного элемента. Показано, что этот показатель для труб с винтовой поверхностью теплообмена при определенных геометрических соотношениях может изменяться от 1,4 до 2.

Применение теплообменных поверхностей при  $\psi > 1,15$  считается целесообразным, поскольку положительно влияет на увеличение теплового потока, передаваемого через стенку и обеспечивает снижение металлоемкости теплообменного аппарата [8]. Следовательно, рассматриваемые винтовые трубы могут быть использованы в качестве эффективных теплообменных элементов трубчатых теплообменников.

Для организации серийного производства предлагаемых теплообменных элементов с использованием современных компьютерных технологий необходимо точное математическое описание геометрии их поверхностей.

В работе [9] рассмотрен универсальный метод построения поверхности, образованной движением непрерывной кривой  $\rho$  вдоль криволинейной направляющей  $g: r = r(t)$ .

Согласно этому методу радиус-вектор точки поверхности записывается в виде суммы:

$$\mathbf{r}(t, s) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{r}(t, s),$$

где  $s$  – произвольный параметр в некоторой плоскости кривой  $\gamma$ . Радиус-вектор точки границы поперечного сечения в выбранной плоскости записывается в виде:

$$\mathbf{r}(t, s) = r_1(t, s)\mathbf{e}_1(t) + r_2(t, s)\mathbf{e}_2(t),$$

где  $\mathbf{e}_1(t)$  и  $\mathbf{e}_2(t)$  – единичные векторы, лежащие в плоскости, пересекающей направляющую кривую в каждой точке, соответствующей параметру  $t$ .

Следовательно,

$$\mathbf{r}(t, s) = \mathbf{r}(t) + r_1(t, s)\mathbf{e}_1(t) + r_2(t, s)\mathbf{e}_2(t). \quad (1)$$

В качестве плоскости, которая пересекает направляющую кривую, наиболее удобно использовать плоскость, нормальную к этой кривой в каждой точке, определяемой параметром  $t$ . В качестве ортов  $\mathbf{e}_1(t)$  и  $\mathbf{e}_2(t)$  наиболее удобно выбирать вектор главной нормали  $\mathbf{n}(t)$  и вектор бинормали  $\mathbf{b}(t)$  направляющей кривой в точке, соответствующей значению параметра  $t$ . В этом случае радиус-вектор точки поверхности представляется в виде суммы  $\mathbf{r}(t, s) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{r}(t, s)$ , где  $s$  – произвольный параметр в нормальной плоскости кривой  $\gamma$ , а  $\mathbf{r}(t, s)$  – радиус-вектор точки границы поперечного сечения в нормальной плоскости, описывается равенством:

$$\mathbf{r}(t, s) = r_n(t, s)\mathbf{n}(t) + r_b(t, s)\mathbf{b}(t).$$

Тогда радиус-вектор точки поверхности представляется в виде:

$$\mathbf{r}(t, s) = \mathbf{r}(t) + r_n(t, s)\mathbf{n}(t) + r_b(t, s)\mathbf{b}(t). \quad (2)$$

Наиболее часто в качестве параметра  $s$  выбирается полярный угол  $\varphi$  в нормальной плоскости кривой  $\gamma$ , отсчитываемый от главной нормали по направлению к бинормали;  $r(t, \varphi)$  – соответствующий «полярный радиус».

Тогда:

$$\mathbf{r}(t, \varphi) = \mathbf{r}(t) + r(t, \varphi) \cos \varphi \mathbf{n}(t) + r(t, \varphi) \sin \varphi \mathbf{b}(t), \quad (3)$$

где  $r(t, \varphi)$  – переменный радиус границы поперечного сечения канала.

Единичные векторы касательной  $\mathbf{t}$ , нормали  $\mathbf{n}$  и бинормали  $\mathbf{b}$  вычисляются по формулам:

$$\mathbf{t} = \frac{d\mathbf{r}/dt}{|d\mathbf{r}/dt|}, \quad \mathbf{n} = \frac{d\mathbf{t}/dt}{|d\mathbf{t}/dt|}, \quad \mathbf{b} = [\mathbf{t} \times \mathbf{n}] \quad (4)$$

или по формулам:

$$\mathbf{t} = \frac{d\mathbf{r}/dt}{|d\mathbf{r}/dt|}, \quad \mathbf{b} = \frac{[d\mathbf{r}/dt \times d^2\mathbf{r}/dt^2]}{|[d\mathbf{r}/dt \times d^2\mathbf{r}/dt^2]|}, \quad \mathbf{n} = [\mathbf{b} \times \mathbf{t}]. \quad (5)$$

Для описания поверхности винтовой трубы, образованной движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом цилиндре выберем в качестве ортов следующие векторы:

$$\mathbf{u}_1(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ и } \mathbf{u}_2(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix},$$

а в качестве направляющей кривой – винтовую линию, расположенную на эллиптическом цилиндре:

$$\gamma: x=r_1 \cos t, y=r_2 \sin t, z=bt, 0 \leq t \leq \pi n,$$

где  $n$  – количество витков винтовой линии.

В качестве образующей кривой выберем треугольник, определяемый заданной высотой  $h$ , проведенной к основанию длиной  $l=l_d+l_k$  и проекциями двух сторон  $l_d$  и  $l_k$  на третью сторону, к которой проведена высота в плоскости с ортами  $\mathbf{u}_1$  и  $\mathbf{u}_2$ :

$$\mathbf{r}: \mathbf{r}(t,s) = s\mathbf{u}_1(t) + f(s)\mathbf{u}_2(t), \quad -l_d \leq s \leq l_k,$$

где

$$f(s) = \begin{cases} (h(l_d+l_k)/l_d)s + h, & -l_d \leq s \leq 0, \\ -(h(l_d+l_k)/l_k)s + h, & 0 \leq s \leq l_k. \end{cases} \quad (6)$$

Тогда уравнение боковой поверхности канала запишется в виде:

$$\mathbf{r}(t,s) = \begin{pmatrix} r_1 \cos t \\ r_2 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + f(s) \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad -l_d \leq s \leq l_k, \quad (7)$$

где  $b=(l_d+l_k)/(2\pi)$ .

На рис. 2 представлена труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом цилиндре, поверхность которой построена по уравнению (7).



Рис. 2. Труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом цилиндре

Для описания поверхности винтовой трубы, образованной движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом цилиндре выберем в качестве ортов следующие векторы:

$$\mathbf{u}_1(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ и } \mathbf{u}_2(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix},$$

а в качестве направляющей кривой – винтовую линию, расположенную на круговом цилиндре:

$$\mathbf{g}: x=r_0 \cos t, y=r_0 \sin t, z=bt, 0 \leq t \leq \pi n.$$

Тогда уравнение боковой поверхности запишется как:

$$\mathbf{r}(t,s) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + f(s) \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad -l_d \leq s \leq l_k, \quad (8)$$

где  $f(s)$  определяется с помощью (6), а  $b=(l_d+l_k)/(2\pi)$ .

На рис. 3 представлена труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом цилиндре, поверхность которой построена по уравнению (8).



Рис. 3. Труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом цилиндре

Запишем уравнение поверхности винтовой трубы, образованной движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом конусе. Пусть  $\psi$  – угол конусности.

Выберем в качестве ортов следующие векторы:

$$\mathbf{e}_1(t) = \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \psi \cos t \\ \operatorname{tg} \psi \sin t \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{e}_2(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ -\operatorname{tg} \psi \end{pmatrix},$$

а в качестве направляющей кривой винтовую линию, лежащую на эллиптическом конусе:

$$g: x = (r_1 + b \operatorname{tg} \psi) \cos t, y = (r_2 + b \operatorname{tg} \psi) \sin t, z = bt, 0 \leq t \leq p n.$$

Тогда уравнение боковой поверхности канала запишется как:

$$\mathbf{r}(t, s) = \begin{pmatrix} (r_1 + b \operatorname{tg} \psi) \cos t \\ (r_2 + b \operatorname{tg} \psi) \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{s}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \psi \cos t \\ \operatorname{tg} \psi \sin t \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{f(s)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ -\operatorname{tg} \psi \end{pmatrix}, -l_d \leq s \leq l_k, \quad (9)$$

где  $f(s)$  определяется с помощью (6), а  $b = (l_d + l_k) / (2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} p)$ .

Запишем уравнения поверхности трубы в координатном виде:

$$\begin{cases} x(t, s) = \left[ (r_1 + b \operatorname{tg} \psi) + \frac{(s \operatorname{tg} \psi + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right] \cos t; \\ y(t, s) = \left[ (r_2 + b \operatorname{tg} \psi) + \frac{(s \operatorname{tg} \psi + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right] \sin t; \\ z(t, s) = bt + \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}. \end{cases}$$

Для удобства введем новый параметр  $\theta$ :

$$\begin{cases} s = s \\ q = bt + \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}. \end{cases}$$

Следовательно,

$$t = q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{b\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}.$$

Тогда

$$\begin{cases} x(q, s) = \left[ \left( r_1 + b \left( q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{b\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right) \operatorname{tg} \psi \right) + \frac{(s \operatorname{tg} \psi + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right] \cos \left[ q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{b\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right]; \\ y(q, s) = \left[ \left( r_2 + b \left( q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{b\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right) \operatorname{tg} \psi \right) + \frac{(s \operatorname{tg} \psi + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right] \sin \left[ q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \psi}{b\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}} \right]; \\ z(t, s) = q. \end{cases}$$

Здесь  $0 \leq s \leq l_d + l_k, 0 \leq \theta \leq l_d + l_k$ .

На рис. 4 представлена труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом конусе.





Рис. 4. Труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на эллиптическом конусе

Для описания поверхности винтовой трубы, образованной движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом конусе выберем в качестве ортов векторы:

$$\mathbf{e}_1(t) = \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \gamma \cos t \\ \operatorname{tg} \gamma \sin t \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{e}_2(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ -\operatorname{tg} \gamma \end{pmatrix},$$

а в качестве направляющей кривой винтовую линию, лежащую на круговом конусе:

$$g: x = (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) \cos t, y = (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) \sin t, z = bt, 0 \leq t \leq p n.$$

Здесь  $\psi$  – угол конусности.

Тогда уравнение боковой поверхности трубы запишется как:

$$\mathbf{r}(t, s) = \begin{pmatrix} (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) \cos t \\ (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{s}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \begin{pmatrix} \operatorname{tg} \gamma \cos t \\ \operatorname{tg} \gamma \sin t \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{f(s)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ -\operatorname{tg} \gamma \end{pmatrix}, \quad -l_d \leq s \leq l_k,$$

где  $f(s)$  определяется с помощью (6), а  $b = (l_d + l_k) / (2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} p)$ .

Запишем уравнения поверхности трубы в координатном виде:

$$\begin{cases} x(t, s) = \left[ (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(s \operatorname{tg} \gamma + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right] \cos t; \\ y(t, s) = \left[ (r_0 + b \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(s \operatorname{tg} \gamma + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right] \sin t; \\ z(t, s) = bt + \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}}. \end{cases}$$

Для удобства введем новый параметр  $\Theta$ :

$$\begin{cases} s = s \\ q = bt + \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \end{cases}$$

Следовательно,

$$\begin{cases} s = s \\ t = q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} x(q, s) = \left[ \left( r_0 + b \left( q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right) \operatorname{tg} \gamma \right) + \frac{(s \operatorname{tg} \gamma + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right] \cos \left[ q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right]; \\ y(q, s) = \left[ \left( r_0 + b \left( q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right) \operatorname{tg} \gamma \right) + \frac{(s \operatorname{tg} \gamma + f(s))}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right] \sin \left[ q/b - \frac{s - f(s) \operatorname{tg} \gamma}{b \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} \right]; \\ z(t, s) = q. \end{cases}$$

Здесь  $0 \leq s \leq l_d + l_k$ ,  $0 \leq \theta \leq l_d + l_k$ .

На рис. 5 представлена труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом конусе.



Рис. 5. Труба с винтовой поверхностью теплообмена, образованная движением треугольника в плоскости осевого сечения вдоль винтовой линии, расположенной на круговом конусе

Одной из наиболее современных технологий изготовления винтовых труб является метод ротационнойковки (или ротационного обжатия), реализуемый на специальных ротационно-ковочных машинах, где уравнения поверхностей используются при работе аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего непрерывное производство труб [10].

На рис. 6 изображен теплообменный элемент, полученный методом ротационнойковки.



Рис. 6. Теплообменный элемент, полученный методом ротационного обжатия

Предлагаемый класс теплообменных элементов разработан для модернизации и реконструкции существующего морально устаревшего и физически изношенного парка трубчатого теплообменного оборудования с помощью замены гладкотрубных теплообменных элементов винтовыми трубами, а также для производства на их базе широкой номенклатуры инновационного энерго- и ресурсосберегающего теплообменного оборудования для различных отраслей промышленности.

### Список библиографических ссылок

1. Теплообменный элемент : пат. 119452 Рос. Федерация. № 2012109355/06 ; заявл. 12.03.12 ; опубл. 20.08.12. Бюл. № 23.
2. Теплообменный элемент : пат. 139566 Рос. Федерация. № 2013125072/06 ; заявл. 25.07.13 ; опубл. 20.04.14. Бюл. № 11.
3. Теплообменный элемент : пат. 146241 Рос. Федерация. № 201446289 ; заявл. 20.04.14 ; опубл. 10.10.14. Бюл. № 28.
4. Теплообменный элемент : пат. 140683 Рос. Федерация. № 2013154131 ; заявл. 05.12.13 ; опубл. 20.05.14. Бюл. № 14.
5. Теплообменный элемент : пат. 137749 Рос. Федерация. № 2013144123/02 ; заявл. 01.10.13 ; опубл. 27.02.14. Бюл. № 6.
6. Багоутдинова А. Г., Золотонос Я. Д., Посохин В. Н. Конструкции эффективных теплообменных элементов для скоростных теплообменников // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2014. № 7. С. 72–75.
7. Багоутдинова А. Г., Золотонос Я. Д., Посохин В. Н. Математическое моделирование винтовых теплообменных элементов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 8. С. 41–46.

8. Письменный Е. Н., Баранюк М. М., Вознюк М. М. Равноразвитые поверхности теплообмена и методика численных исследований их теплогидравлических характеристик // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34. № 1. С. 45–54.
9. Багоутдинова А. Г., Вачагина Е. К., Золотонос Я. Д. Математическое моделирование теплообменных поверхностей пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 146–157.
10. Багоутдинова А. Г., Золотонос А. Я., Золотонос Я. Д., Яхнев М. Н. Современные теплообменные элементы теплообменного оборудования и технологии их изготовления // Известия КГАСУ. 2013. № 2 (24). С. 150–156.

**Bagoutdinova A.G.** – candidate of technical sciences

E-mail: [bagoutdinova@rambler.ru](mailto:bagoutdinova@rambler.ru)

**Kazan (Volga region) Federal University**

The organization address: 420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya st., 18

**Vachagina E.K.** – doctor of technical sciences

E-mail: [vachagina@mail.ru](mailto:vachagina@mail.ru)

**Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Lobachevsky st., 2/3

**Zolotonosov Ya.D.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [zolotonosov@mail.ru](mailto:zolotonosov@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Mathematical modeling of pipes with a helical heat exchange surface

#### Abstract

*Problem statement.* To improve the thermohydrodynamic efficiency of tubular devices, it is necessary to develop new designs for heat exchange elements that are characterized by high thermal efficiency, manufacturability and low production costs.

In this regard, the authors proposed a series of helical pipes with a high degree of development of heat exchange surfaces

*Results.* Mathematical models of pipes with a helical heat exchange surface of various configurations are constructed in this paper. The parameters included in the mathematical models allow us to investigate and further optimize the internal geometry of the pipes.

*Conclusions.* The significance of the obtained results for the construction area is that the proposed heat exchange elements are installed in innovative heat exchangers installed in individual heat points. In addition, that a strict mathematical description of pipes with a helical heat exchange surface will allow using modern computer technologies when manufacturing the proposed heat exchange elements.

**Keywords:** modeling, helical surface, helix, hydromechanics, heat exchanger.

#### References

1. Heatexchange element : patent 119452 of the Rus. Federation. № 2012109355/06 ; decl. 12.03.12 ; publ. 20.08.12. Bull. in № 23.
2. Heatexchange element : patent 139566 of the Rus. Federation. № 2013125072/06 ; decl. 25.07.13 ; publ. 20.04.14. Bull. in № 11.
3. Heatexchange element : patent 146241 of the Rus. Federation. № 201446289 ; decl. 20.04.14 ; publ. 10.10.14. Bull. in № 28.
4. Heatexchange element : patent 146241 of the Rus. Federation. № 2013154131 ; decl. 05.12.13; publ. 20.05.14. Bull. in № 14.
5. Heatexchange element : patent 137749 of the Rus. Federation. № 2013144123/02 ; decl. 01.10.13 ; publ. 27.02.14. Bull. in № 6.

6. Bagoutdinova A. G., Zolotonosov Ya. D., Posokhin V. N. Designs of effective heat-exchange elements for high-speed heat exchangers // *Santehnika. Otoplenie. Conditionirovanie*. 2014. № 7. P. 72–75.
7. Bagoutdinova A. G., Zolotonosov Ya. D., Posokhin V. N. Mathematical modeling of helical heat exchange elements // *Stroitelstvo*. 2014. № 8. P. 41–46.
8. Pismennyi E. N., Baranyuk M. M., Voznyuk M. M. Equalized heat transfer surfaces and the technique of numerical studies of their thermo hydraulic characteristics // *Promischlennaya teplotechnika*. 2012. V. 34. № 1. P. 45–54.
9. Bagoutdinova A. G., Vachagina E. K., Zolotonosov Ya. D. Mathematical modeling of heat-exchange surfaces of spring-twisted channels // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 3 (41). P. 146–157.
10. Bagoutdinova A. G., Zolotonosov A. Ya., Zolotonosov Ya. D., Yakhnev M. N. Modern heat-exchange elements of heat-exchange equipment and technologies for their production // *Izvestiya KGASU*. 2013. № 2 (24). P. 150–156.

УДК 532.5.032+532.55

**Варсегова Е.В.** – кандидат физико-математических наук

E-mail: [evarsegova@yandex.ru](mailto:evarsegova@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Ахмерова Д.Р.** – инженер

E-mail: [dilkin93@list.ru](mailto:dilkin93@list.ru)

**ООО «Норд-Трейд»**

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Ульянова-Ленина, д. 19

## Исследование течения в каналах различных форм

### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – численно с помощью пакета программ Fluent исследовать пространственное течение воздуха на прямолинейном участке воздуховода при различных формах канала (поперечное сечение канала было взято в форме круга, эллипса, овала, прямоугольника). Результаты численного моделирования сравнить с экспериментальными данными и расчетами других авторов.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что выбраны такие формы канала, которые обладают наименьшим сопротивлением, что позволит сократить энергию, потребляемую системой вентиляции.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что найдены коэффициенты сопротивления трения труб некруглого сечения. Оптимальной формой сечения канала является, конечно же, круг. Однако воздуховоды плоскоовального сечения имеют наиболее близкий коэффициент сопротивления к данным круга, что говорит о целесообразности применения подобных каналов.

**Ключевые слова:** вентиляция, овальный канал, круглый канал, прямоугольный канал, численное моделирование, трехмерное течение, коэффициент сопротивления.

### Введение

В настоящее время системы вентиляции необходимы не только при крупном промышленном производстве или устройстве специализированных лабораторий, но также и при создании здорового микроклимата в собственном доме. Грамотное проектирование и монтаж вентиляционных систем в помещениях дома поможет обеспечить его свежим воздухом в нужном объеме. Наличие вентиляции в собственном доме имеет особую важность для обеспечения здоровой среды людям, проводящим в помещении большую часть своего времени. Современные правильно спроектированные вентиляционные системы не потребляют много электрической энергии, и соответствует современным требованиям в этой области [1, 2].

При проектировании системы вентиляции и выборе формы воздухопроводов часто стоит выбор между компактностью прямоугольных и высокой эффективностью круглых воздухопроводов. Есть возможность сэкономить пространство или снизить потери давления воздуха. Существует решение, которое позволяет совместить преимущества и тех и других воздухопроводов – это применение плоскоовальных воздухопроводов. Такие воздухопроводы характеризуются меньшим сопротивлением потоку воздуха в сравнении с прямоугольными воздухопроводами, а значит потери давления в них меньше. Компактная форма и привлекательный внешний вид позволяет соперничать плоскоовальным воздухопроводам с круглыми. Эффективность воздухопроводов круглого сечения все же остается выше.

В связи с широким применением плоскоовальных воздухопроводов, актуальными являются исследования таких воздухопроводов, с целью разработки рекомендаций по их изготовлению и совершенствованию. В том числе необходимо выбрать такую форму сечения канала, которая позволит снизить затраты на аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. Поэтому в настоящей работе исследуется влияние формы канала на сопротивление трения и на основании результатов исследований, подбирается оптимальная форма канала, с точки зрения уменьшения сопротивления. Задача решается

численно с использованием универсального многоцелевого вычислительного программного комплекса Fluent, который способен решать задачи гидродинамики и теплообмена, моделировать многофазные среды, а также процессы, связанные со сложными физико-химическими взаимодействиями [3-6].

### Постановка задачи

Рассматривалось пространственное течение воздуха (плотность  $\rho=1,225$  кг/м<sup>3</sup>, динамический коэффициент вязкости  $\mu=1,789 \cdot 10^{-5}$  кг/м·с) на прямолинейном участке трубопровода при различных формах канала (поперечное сечение канала было взято в форме круга, эллипса, овала, прямоугольника). Исследуемые формы канала отличались площадью, формой и соотношением определяющих величин (табл. 1). Геометрия расчетной области с овальным сечением канала приведена на рис. 1 а. Рассматривались и другие формы сечения канала (рис. 1 б-д). Длина канала принята постоянной  $l=3$  м.

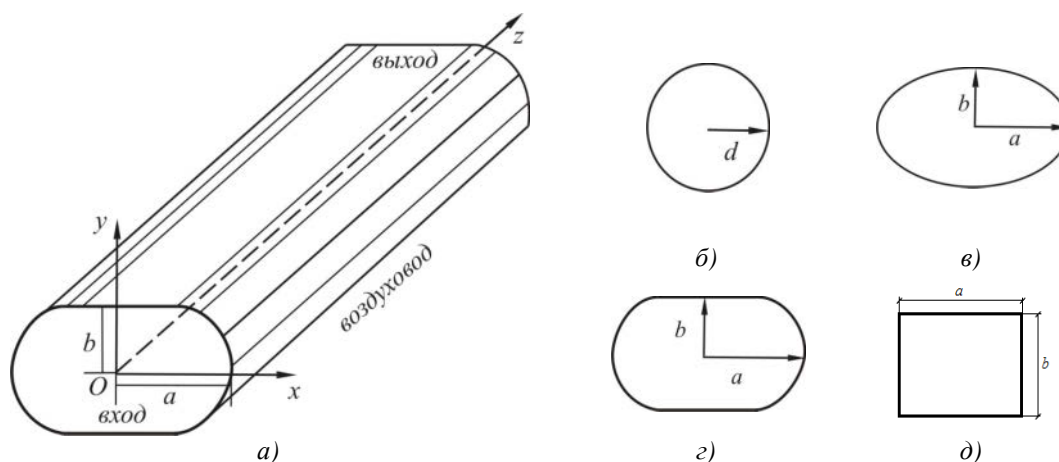


Рис. 1. Расчетная область: а – геометрия канала; б – круглое сечение; в – эллиптическое сечение; г – овальное сечение; д – прямоугольное сечение

Таблица 1

Характеристики рассчитываемых сечений каналов

Параметр	Размерность	Форма сечения канала					
		Эллипс 1	Эллипс 2	Эллипс 3	Прямоугольник	Круг	Овал
1	2	3	4	5	6	7	8
$a$ , большая полуось	м	0,15	0,1	0,0625	0,1	0,05	0,0625
$b$ , малая полуось	м	0,03	0,025	0,04	0,0785	0,05	0,0359
Площадь, $S$	м <sup>2</sup>	0,0141	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
Периметр, $\Pi$	м	0,565	0,393	0,322	0,357	0,314	0,332
Гидравлический диаметр, $D_r$	м	0,100	0,080	0,098	0,088	0,100	0,095

### Решение

Основной расчетной формулой для потерь давления при турбулентном течении жидкости в прямых каналах постоянного поперечного сечения является эмпирическая формула Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_{тр} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{S_0}{S} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\Pi l}{S} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{l}{R_r} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \lambda \frac{l}{D_r} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\Pi$  – периметр, м;  $R_r$  – гидравлический радиус, м;  $S_0$  – площадь поверхности трения, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $v$  – средняя скорость потока в сечении, м/с.

Расчет основных параметров течения потока в канале производился численно с помощью программы Fluent, в котором решаются уравнения движения жидкости – уравнения Навье-Стокса. Моделируется развитое турбулентное течение, и для замыкания системы используется модель турбулентности. К сожалению, в настоящее время не

существует универсальной модели. Ее выбор зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и затрат времени, необходимых на процесс моделирования. После проведения тестирования различных моделей турбулентности, была выбрана стандартная модель  $k-\varepsilon$  (Standard Wall Function).

В качестве граничных условий были выбраны следующие: воздуховод – непроницаемая поверхность, на входе потока задавался постоянный расход равный  $L=0,1$  кг/с, на выходе – избыточное давление  $\Delta p_{\text{вых}}=0$  (рис. 1а).

На первом этапе решения проводилась проверка на «сеточную зависимость». При численном исследовании течений в каналах важным является использование пристеночных функций, а также правильное измельчение (адаптация) сетки вблизи твердых поверхностей. В ходе адаптации сетки, было выявлено, что пристеночное моделирование на характеристики рассматриваемого течения и результаты численного исследования не влияют (рис. 2).

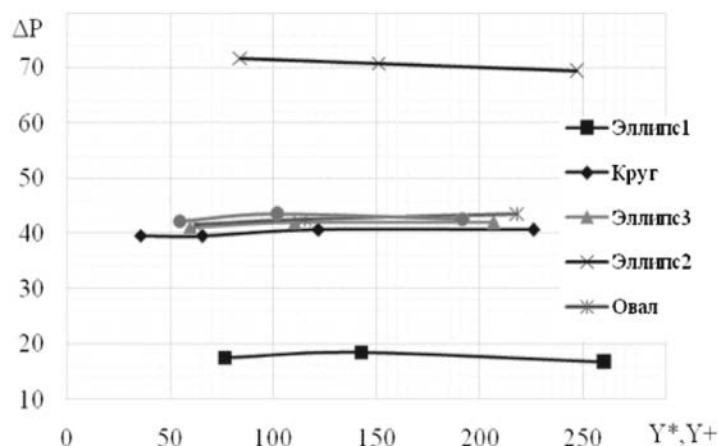


Рис. 2. Графики зависимости  $\Delta p=f(Y^*, Y^+)$

Численное решение позволило получить значения давления на входе и выходе, которые были использованы для расчета коэффициента сопротивления воздуховода по формуле:

$$\lambda = \frac{D_r}{l} \cdot \frac{\Delta p}{p_d}, \quad (2)$$

где  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$  – потери полного давления в воздуховоде,  $p_d = \rho v^2 / 2$  – динамическое давление.

Для подтверждения адекватности численных решений было выполнено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными и расчетами других авторов для каналов аналогичной геометрии [7-9].

Теоретический коэффициент сопротивления определялся по формуле:

$$I_{\text{теор}} = 0,11 \left( \frac{k_s}{D_r} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где  $k_s=0$  – коэффициент эквивалентной шероховатости, а число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{LD_r r}{mS}.$$

Использование гидравлического (эквивалентного) диаметра в качестве характерного размера в формуле сопротивления (3) допустимо в тех случаях, когда почти всему периметру сечения толщина пристеночного слоя очень мала по сравнению с размером поперечного сечения канала ( $\delta_0 \ll D_c$ ).

Коэффициент сопротивления трения труб некруглого сечения проще определять введением в формулы для труб круглого сечения соответствующих поправочных коэффициентов [7]:

$$\lambda_n = k_n \cdot \lambda_{\text{теор}},$$

где  $\lambda_n$  – коэффициент сопротивления трения для труб некруглого сечения;

$\lambda_{теор}$  – коэффициент сопротивления трения труб круглого сечения при этом же числе Рейнольдса;

$k_n$  – поправочный коэффициент учитывающий влияние формы поперечного сечения труб.

Поправочный коэффициент для труб эллиптического сечения, зависит от отношения осей эллипса. При турбулентном течении с некоторым приближением применяется  $k_{эл} \approx 1,0$ . Для труб прямоугольного сечения –  $k_{пр} = 1,0 \div 1,1$ . При  $a/b = 1,0$  поправочный коэффициент  $k_{пр} = 1,0$ , а если  $a/b \rightarrow 0$ , то  $k_{пр} = 1,1$ .

Результаты расчетов коэффициентов сопротивления, полученных с помощью Fluent по формуле (2) и по теоретической формуле (3) для всех рассчитанных моделей представлены в табл. 2. Сравнение результатов показывает хорошее совпадение.

Таблица 2

### Результаты расчетов коэффициентов сопротивления

Сечение канала	$D_r$ , м	Re	$P_d$ , Па	$P_{вых}$ , Па	$P_{вх}$ , Па	$\Delta P$ , Па	$\lambda$	$\lambda_{теор}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Круг	0,100	58115	66,24	70,88	110,51	39,63	0,0199	0,0203
Эллипс 1	0,100	32286	20,44	21,39	38,95	17,56	0,0286	0,0236
Эллипс 2	0,080	46492	66,24	71,71	128,35	56,64	0,0228	0,0215
Эллипс 3	0,098	56697	66,24	70,85	111,92	41,07	0,0202	0,0205
Овал	0,095	54898	65,40	70,28	111,98	41,70	0,0200	0,0206
Прямоугольник	0,088	51115	62,57	71,39	118,47	47,08	0,0209	0,0210

Рассчитав коэффициенты сопротивления, были построены зависимости изменения коэффициента сопротивления от числа Re для всех исследуемых каналов (рис. 3). На этом же графике были нанесены соответствующие линии теоретического коэффициента сопротивления.

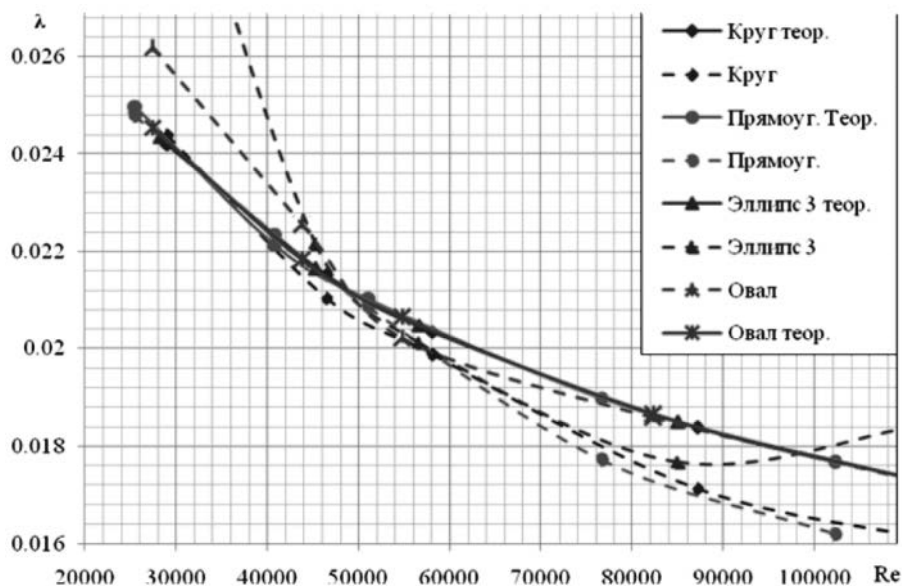


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Re

На основе проделанных расчетов можно сделать вывод, что оптимальной формой сечения канала является, конечно, круг. Модель «Овал» имеет наиболее близкий коэффициент сопротивления к данным круга, что говорит о целесообразности применения подобных каналов.



### Заключение

Самая оптимальная форма сечения воздуховодов – круглая, проведенные, расчеты это подтверждают. Наиболее невыгодными формами сечения канала являются прямоугольные и некоторые эллиптические. Однако, прямоугольная форма воздуховодов обычно применяется в системах вентиляции. Это объясняется тем, что в большинстве случаев приходится размещать вентиляционные каналы в ограниченном пространстве. При одинаковой высоте круглого и прямоугольного воздуховода, сечение последнего может быть в разы больше. Каналы овального сечения уступают по своим характеристикам круглым, но исследования показали, что можно выбрать наиболее благоприятную форму. Овальная форма определенного поперечного сечения обеспечивает меньшую площадь контакта, что способствует свободному потоку воздуха в сравнении с прямоугольной формой канала, имеет меньшее сопротивление. В некоторых случаях результаты коэффициента сопротивления близки к круглым каналам. С экономической точки зрения, уменьшение сопротивления приводит к уменьшению затрат на вложение, что говорит о целесообразности применения подобных каналов при необходимости и обоснованности решения. Эксплуатационные расходы прямоугольного канала больше, чем плоскоовального, что указывает на выбор второго воздуховода [10]. Также преимуществами плоскоовального воздуховода являются высота и эстетичность, в сравнении с круглыми. Однако сложность изготовления фасонных деталей плоскоовальных воздуховодов в настоящее время вытесняют их на задний план.

### Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. 209 с.
2. Королева Т. И., Широкова О. Н. Исследование распределения воздуха по длине воздуховодов равномерной раздачи // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Прикладные науки. Строительство. 2009. № 12. С. 89–94.
3. Мухаметзянова А. Г., Дьяконов Г. С., Кульментьева Е. И. Современные компьютерные технологии в исследовании течений в каналах различной геометрии // Вестник Казанского Технологического университета. 2005. № 2. С. 164–172.
4. Никущенко Д. В. Применение расчетного комплекса FLUENT для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости. СПб. : СПбГМТУ, 2005. 97 с.
5. Nuno M. C. Martins, Nelson J. G. Carrigo, Helena M. Ramos, Didia I. C. Covas. Velocity distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis // Instituto Superior Tecnico. Universidade de Lisboa, Portugal. 2014. 18 p.
6. Зиганшин А. М. Снижение энергозатрат при движении потоков путем профилирования фасонных частей в коммуникациях энергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 1. С. 63–68.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
8. Muzychka Y. S., Yovanovich M. M. Pressure Drop in Laminar Developing Flow in Noncircular Ducts: A Scaling and Modeling Approach // Journal of Fluids Engineering, 2009. Vol. 131/111105-1. 11 p.
9. Волгин Г. В. Уточнение методов расчета коэффициента гидравлического сопротивления гладких открытых каналов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12, Вып. 1 (100). С. 94–98.
10. Самарин О. Д. Оптимизация диаметров воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха // С.О.К. 2010. № 12. С. 37–42.

**Varsegova E.V.** – candidate of physical and mathematical sciences

E-mail: [evarsegova@yandex.ru](mailto:evarsegova@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Akhmerova D.R.** – engineer

E-mail: [dilkin93@list.ru](mailto:dilkin93@list.ru)

**LTD «Nord-Trade»**

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Ulyanova-Lenina st., 19

## Research of the flow in channels of different forms

### Abstract

*Problem statement.* The aim of the study was to study numerically the spatial flow of air in a straight section of the duct with the help of the Fluent software package for various channel shapes (the channel cross-section was taken in the form of a circle, ellipse, oval, rectangle). The results of numerical simulation are compared with the experimental data and calculations of other authors.

*Results.* The main results of the study are that such forms selected channels, which have the least resistance, which will reduce the energy consumed by the ventilation system.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is that the friction coefficients of pipes of non-circular cross-section are found. The optimal shape of the channel cross section is, of course, the circle. However, the ducts of the flat-oval cross section have the closest coefficient of resistance to the data of the circle, which indicates the advisability of using such channels.

**Keywords:** ventilation, oval channel, numerical modeling, three-dimensional flow, coefficient of resistance.

### References

1. Posokhin V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : AVOK-PRESS, 2008. 209 p.
2. Koroleva T. I., Shirokova O. N. Investigation of air distribution along the length of air ducts of uniform distribution // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. F, Prikladnie nayki. Stroitelstvo. 2009. № 12. P. 89–94.
3. Mukhametzyanova A. G., Dyakonov G. S., Kulmenteva E. I. Modern computer technologies in the study of flows in channels of various geometries // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta. 2005. № 2. P. 164–172.
4. Nikushchenko D. V. Application of the computational complex FLUENT for modeling viscous incompressible fluid flows. SPb. : SPbGMTU. 2005. 97 p.
5. Nuno M. C. Martins, Nelson J. G. Carrigo, Helena M. Ramos, Didia I. C. Covas. Velocity distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis // Instituto Superior Tecnico. Universidade de Lisboa, Portugal. 2014. 18 p.
6. Ziganshin A. M. Reduction of energy consumption in traffic flow by profiling fittings in communications power plants // Nadegnost i bezopasnost energetiki. 2015. № 1. P. 63–68.
7. Idelchik I. E. Handbook of hydraulic resistance. Edition 3, recycled and additional. M. : Mashinostrieniye, 1992. 672 p.
8. Muzychka Y. S., Yovanovich M. M. Pressure Drop in Laminar Developing Flow in Noncircular Ducts: A Scaling and Modeling Approach // Journal of Fluids Engineering. 2009. Vol. 131/111105-1. 11 p.
9. Volgin G. V. Refinement of methods for calculating the coefficient of hydraulic resistance of smooth open channels // MGSU. 2017. T. 12, Iss. 1 (100). P. 94–98.
10. Samarin O. D. Optimization of the diameters of the ducts of systems of ventilation and air-conditioning // S.O.K. 2010. № 12. P. 37–42.

УДК 697.922.564

**Давыдов А.П.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: [ap\\_Davidov@mail.ru](mailto:ap_Davidov@mail.ru)**Валиуллин М.А.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: [posohin@kgasu.ru](mailto:posohin@kgasu.ru)**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Методика расчета всасывающих воздухопроводов с присоединением расхода по пути (Метод коэффициентов расхода)

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Целью работы является разработка методики расчета воздухоприемных устройств различной геометрии при стационарной и не стационарной режимах работы.

*Результаты.* При удалении вредных выделений от технологического оборудования используются воздухоприемники различной конструкции. Высокая эффективность работа таких устройств зависит от точности расчета указанных устройств, обеспечивающих заданный объем удаляемого воздуха. Регулирование расхода воздуха по площади воздухоприемника осуществляется изменением коэффициента расхода, который определяется предлагаемой методикой расчета.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в возможности рассчитать воздухоприемное устройство любой геометрии при стационарном и не стационарном режимах работы.

**Ключевые слова:** методика расчета всасывающих воздухопроводов, равномерно-всасывающий воздухопровод, отверстие, внутренний экран, коэффициент расхода.

В вентиляционной практике для расчета всасывающих воздухопроводов наиболее распространенными являются методики В.Н. Посохина [1, 2]. В известной мере это объясняется достаточной упрощенностью этих методов расчета. Упрощения приводят на практике к существенным отклонениям от поставленных задач, а также завышенным энергетическим затратам (большое сопротивление всасывающих воздухопроводов, завышенные объемы удаляемого воздуха). Специальные исследования по оптимизации конструкций всасывающих воздухопроводов отсутствуют. Цель работы – разработка методики расчета воздухоприемных устройств различной геометрии при стационарной и нестационарных условиях работы.

Рассмотрим собирающий воздухопровод произвольной геометрии (рис. 1). Пусть направление движение воздуха в воздухоприемнике произвольное вдоль осей  $x, y, z$  со скоростью  $W$ . Вход воздуха проходит непрерывно через стенки воздухоприемника в плоскостях  $XOY$  (4'-1-3-3'),  $XOZ$  (1-4-4'-1'),  $YOZ$  (1-2-3-4) соответственно со скоростью  $V_{xy}, V_{xz}, V_{yz}$ . Стенки воздухоприемника бесконечно тонкие. Каждая грань воздухоприемника имеет собственную проникающую способность характеризуемую коэффициентом расхода на всасывание  $\mu_{u,xy}, \mu_{u,xz}, \mu_{u,yz}$  и на истечение  $\mu_{v,xy}, \mu_{v,xz}, \mu_{v,yz}$ . Скорость истечения соответственно  $W_x, W_y, W_z$ . Течение воздуха рассматривается как течение не сжимаемой жидкости. Течение изотермическое. Скорость всасывания принимается  $V_i$ ; скорость в воздухопроводе –  $W_{xyz}$ .

Основной задачей является – рассчитать воздухопровод таким образом, чтобы удельные расходы по площадям всасывания соответствовали поставленным требованиям. В общем случае удельный расход воздуха через грани воздухоприемника при нестационарной работе можно записать в виде:

$$q_i = f(x, y, z, t). \quad (1)$$

Или в соответствии плоскостям всасывания:

$$q_{xoz} = f(x, z; t); q_{yoz} = f(y, z; t); q_{xoy} = f(x, y; t). \quad (2)$$

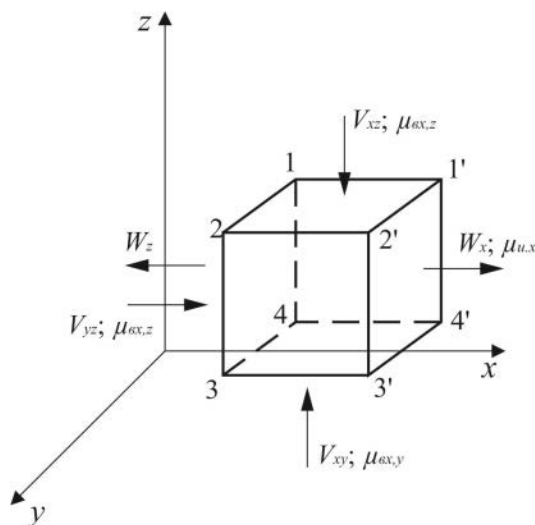


Рис. 1. Расчетная схема воздухопровода (схема течения)

**Стационарное всасывание воздуха**

При стационарной работе воздухоприемного устройства вход воздуха проходит через соответствующие грани. По оси *x* грань 1-1'-4'-4 со скоростью входа  $V_{xz}$  и переменным коэффициентом расхода  $\mu_{v,x,z}$ . По оси *y* грань 1-2-3-4 со скоростью входа  $V_{yz}$  и переменным коэффициентом расхода  $\mu_{v,y,z}$ . По оси *z* грань 4-3-3'-4' со скоростью входа  $V_{xy}$  и переменным коэффициентом расхода  $\mu_{v,x,y}$ .

Истечение воздуха происходит через соответствующие грани. По оси *x* через грань 1'-2'-3'-4' скорость истечения  $W_x$  коэффициент расхода истечения  $\mu_{u,x}$ . По оси *y* через грань 2-2'-3'-3 скорость истечения  $W_y$  коэффициент расхода истечения  $\mu_{u,y}$ . По оси *z* через грань 1-1'-2'-2 скорость истечения  $W_z$  коэффициент расхода истечения  $\mu_{u,z}$ .

При неравномерном заборе воздуха по плоскостям всасывания скорости всасывания будут равны:

$$V_{xz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial z}\right)^2}; \tag{3a}$$

$$V_{yz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial z}\right)^2}; \tag{3б}$$

$$V_{xy} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial y}\right)^2}. \tag{3в}$$

Скорость воздуха во всасывающих плоскостях можно определить по выражению:

$$V_{xz} = \frac{j_x}{(\sqrt{e_x + z_{\theta,x}})} \sqrt{\frac{2dP_x}{df_x r}}; \tag{4a}$$

$$V_{yz} = \frac{j_y}{(\sqrt{e_y + z_{\theta,y}})} \sqrt{\frac{2dP_y}{df_y r}}; \tag{4б}$$

$$V_{xy} = \frac{j_z}{(\sqrt{e_z + z_{\theta,z}})} \sqrt{\frac{2dP_z}{df_z r}}. \tag{4в}$$

где  $\varphi_i$  – коэффициент скорости;  $\varepsilon_i$  – коэффициент сжатия струи;  $\zeta_i$  – коэффициент местного сопротивления.

Для нашего случая, можно принять,  $\varphi = 1$ ,  $\varepsilon = 1$  учитывая, что стенка имеет бесконечно малую толщину. Обозначая величину соотношения  $\frac{1}{\sqrt{1+z_{e,i}}} = m_{e,i}$ , как локальный коэффициент расхода можем записать:

$$m_{e,xz} = \left( \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial z}\right)^2} \right) \sqrt{\frac{df_x r}{2dP_x}}; \tag{5a}$$

$$m_{e,yz} = \left( \sqrt{\left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial z}\right)^2} \right) \sqrt{\frac{df_y r}{2dP_y}}; \tag{5б}$$

$$m_{e,xy} = \left( \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial y}\right)^2} \right) \sqrt{\frac{df_z r}{2dP_z}}. \tag{5в}$$

**Нестационарное всасывание воздуха**

Для нестационарного потока скорость входа можно выразить в зависимости от изменения удельного расхода по площади всасывания:

$$V_{xz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} dt\right)^2}; \tag{6a}$$

$$V_{yz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} dt\right)^2}; \tag{6б}$$

$$V_{xy} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} dt\right)^2}. \tag{6в}$$

В случае нестационарной (квазистационарной) работы всасывающих устройств коэффициент расхода можно определить из выражений:

$$m_{e,xz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xz}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} dt\right)^2} \sqrt{\frac{df_x r}{2dP_x}}; \tag{7a}$$

$$m_{e,yz} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{yz}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} dt\right)^2} \sqrt{\frac{df_y r}{2dP_y}}; \tag{7б}$$

$$m_{e,xy} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{xy}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} dt\right)^2} \sqrt{\frac{df_z r}{2dP_z}}. \tag{7в}$$

Выражения (7а-7в) позволяют рассчитать величину коэффициента расхода для любой всасывающей поверхности воздухопровода.

Для определения необходимой величины коэффициента расхода, регулирующего расчетный расход воздуха, необходимо знать распределение удельного расхода по плоскостям всасывания, а также закономерность изменения давления по пути движения воздуха внутри воздухопровода.

Наиболее простой случай работы всасывающего воздухоприемного устройства – воздухопровод постоянного поперечного через одну грань которого равномерно входит поток воздуха.

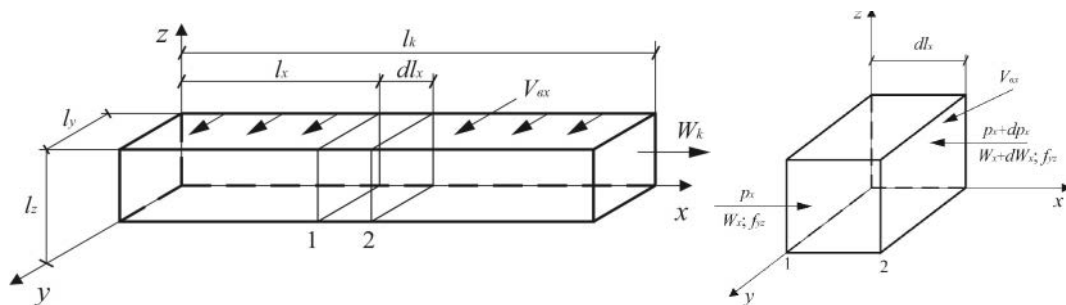


Рис. 2. Расчетная схема воздухопровода постоянного поперечного сечения, входящий в поток не вносит составляющей количества движения

Рассмотрим всасывающий воздухопровод постоянного поперечного сечения  $f=l_y \times l_z$  и длиной  $l_{x(x)}$  (рис. 2). Примем, что воздух поступает в воздухопровод непрерывно и равномерно через грань  $l_x \times l_z$ , скорость входящего потока обозначим через  $V_{вх}$ .

Для рассматриваемого случая коэффициент расхода будет равным:

$$m_{вх} = \left( \sqrt{\left( \frac{\partial q_{xz}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial q_{xz}}{\partial z} \right)^2} \right) \sqrt{\frac{df_x r}{2dP_x}}. \quad (8)$$

При условии, что воздух поступает в воздухопровод непрерывно и равномерно через грань  $l_x \times l_z$ , а также  $\partial q_{xz} / \partial z = 0$  (по оси  $z$  отсутствует изменение давления),  $V_{вх} = const$  и  $\partial q_{xz} / \partial x = V_{вх}$  скорость всасывания по оси  $x$  в расчетном сечении не меняется и остается постоянной, уравнение (8) примет вид:

$$m_x = V_{вх} \sqrt{\frac{df_x r}{2dP_x}}. \quad (9)$$

При условии, что  $V_{вх} = m_0 \sqrt{\frac{2p_{l_0}}{r}}$  и  $dP_x = p_{l_x} \times df_x$  коэффициент расхода в точке на расстоянии  $l_x$  находим из выражения:

$$m_{l_x} = m_0 \sqrt{\frac{p_{l_0}}{p_{l_x}}}. \quad (10)$$

Для определения величины  $\mu_{l_x}$  необходимо знать величину давления в начале воздухопровода –  $p_{l_0}$  и в расчетном сечении –  $p_{l_x}$ .

Поскольку ось  $x$  расположена горизонтально, представляется возможным исключить из учета силы тяжести.

Выделим два сечения 1 и 2, соответственно на расстоянии  $l_x$  и  $l_x + dl_x$ . Допустим одновременно, что давление в плоскости, перпендикулярной оси  $x$  постоянно, а распределение давления подчиняется гидростатическому закону.

В общем виде уравнение изменения проекции количества движения системы (11), равное сумме проекций импульсов внешних сил и при отсутствии инерционных сил, можно записать:

$$\int_{f_{yz}} r(W_x + dW_x)^2 [df_{yz}] - \int_{f_{yz}} rW_x^2 df_{yz} \pm \int_{f_{yz}} rV_{вх}^2 \cos q_x df_{yz} = p_x f_{yz} - (p_x + dp_x) [f_{yz}] - [(t_x) f_{yz}]. \quad (11)$$

Решим уравнение (11) относительно величины давления учитывая, что:

$$\int_{f_{yz}} rW_x^2 df_{yz} = r b_x W_{cp,x}^2 f_{yz}, \quad (12)$$

где  $\beta_x$  – коэффициент Буссинеско.

После преобразования уравнения (12) и пренебрегая составляющими второго порядка малости, учитывая, что  $\cos \theta = 0$  получим:

$$2\rho\beta_x W_{cp,x} = dp_x - dt. \quad (13)$$

Записывая относительно  $dp_x$ , получим:

$$-dp_x = -2\rho\beta_x W_{cp,x} - dt. \quad (14)$$

Здесь представляется целесообразней выразить среднюю скорость в расчетном сечении –  $W_{cp,x}$  через конечную среднюю скорость –  $W_{cp,k}$  в конце воздухопровода.

В нашем случае равномерного присоединения потока по длине:

$$W_{cp,x} = W_{cp,k} \frac{l_x}{l_k}. \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в уравнение (14) опуская индексы ср. получим:

$$-dp_x = -2r b_x W_k^2 \frac{l_x dl_x}{l_k^2} - dt. \quad (16)$$

Принимая

$$dt = \frac{l}{d_{экв}} r \frac{W_k^2}{2} \frac{3l_x^2 dl_x}{l_k^2}. \quad (17)$$

В этом случае уравнение (14) примет вид:

$$dp_x = -2r b_x W_k^2 \frac{l_x dl_x}{l_k^2} - \left[ \frac{l}{d_{экв}} r \frac{W_k^2}{2} \frac{3l_x^2 dl_x}{l_k^2} \right]. \quad (18)$$

В этом уравнении не раскрыта зависимость изменения коэффициента сопротивления трения –  $\lambda$  по длине воздухопровода для движения воздуха с переменным по пути расходом. Обычно здесь принимается –  $\lambda = const$ , что для приближенных расчетов допустимо, но, конечно, не отражает истинной картины. Основная сложность заключается в том, что для различных рассматриваемых сечений воздухопровода число Re, по которому принято определять величину коэффициента трения, неодинаково.

Определения коэффициента трения в настоящее время становится возможным лишь по эмпирическим формулам. Вполне приемлемо дающая хорошую сходимость с опытными данными для области работы воздухопроводов является формула А.Д. Альтшуля [3]:

$$l = 0,11 \left( \frac{K_e}{d_{экр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (19)$$

Подставив это значение (19) в уравнение (18) имеем:

$$dp_{l_x} = -2rb_x W_k^2 \frac{l_x dl_x}{l_k^2} - 0,11 \left( \frac{\kappa}{d_{экр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \left[ r \frac{W_{cp,\kappa}^2}{2d_{экр,x}} \frac{3l_x^2 dl_x}{l_k^2} \right], \quad (20)$$

где  $k$  – коэффициент абсолютной шероховатости, м;  $d_{экр}$  – эквивалентный диаметр, м;  
 $Re = \frac{d_{экр} W_k \frac{l_x}{l_k}}{J}$  – критерий Рейнольдса; 0,11 и 68 – эмпирические коэффициенты.

Записывая уравнение (20) в интегральной форме получим:

$$\int_0^{l_x} dp_{l_x} = - \int_0^{l_x} 2rb_x W_k^2 \frac{l_x dl_x}{l_k^2} - \int_0^{l_x} 0,11 \left( \frac{\kappa}{d_{экр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \left[ r \frac{W_{cp,\kappa}^2}{2d_{экр,x}} \frac{3l_x^2 dl_x}{l_k^2} \right]. \quad (21)$$

Интегрируя уравнение (21) в установленных пределах при условии, что  $\cos \theta = 0$  т.е. входящий поток присоединяется к основному под углом  $\theta = 90^\circ$ , а  $\beta_x = \beta = const$ .

$$p_{l_x} = p_{l_0} + rb W_k^2 \frac{l_x^2}{l_k^2} + 0,11 \left( \frac{\kappa}{d_{экр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \left[ r \frac{W_{cp,\kappa}^2}{2d_{экр,x}} \frac{l_x^3}{l_k^2} \right], \quad (22)$$

где

$$p_{l_0} = \frac{V_{ex}^2}{2m_0^2} r.$$

Решая совместно уравнение (10) и уравнение (22) получим:

$$m_{l_x} = m_{l_0} \sqrt{\frac{V_{ex}^2}{V_{ex}^2 + 2m_{l_0}^2 b W_k^2 \left( \frac{l_x}{l_k} \right)^2 + 0,11 m_{l_0}^2 \frac{W_k^2 l_x^3}{2d_{экр,x} l_k^2} \left( \frac{\kappa}{d_{экр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}}}. \quad (23)$$

Выражение (23) позволяет определить коэффициент расхода по длине линейного воздухопровода постоянного поперечного сечения для случая, когда входящий поток воздуха не вносит составляющей количества движения.

Используя рассматриваемую методику, представляется возможным рассчитать воздухоприемное устройство любого назначения и любой геометрии [4, 5].

#### Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н., Сафиуллин Р. Г., Бройда В. А. Вентиляция. М. : АСВ, 2015. 624 с.
2. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. 209 с.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М. : Недра, 1970. 248 с.
4. Давыдов А. П., Валиуллин М. А. Уравнение движения воздуха в кольцевом равномерно-всасывающем воздухопроводе переменного сечения // Известия КГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 142–146.
5. Давыдов А. П., Ланцов А. Е., Ахмерова Г. М. Работа равномерно-всасывающей панели с отверстиями круглого сечения // ООО «Скрипта». 2013. С. 461–465.
6. Давыдов А. П., Валиуллин М. А. Коэффициент расхода всасывающей щели с внутренним экраном // Известия КГАСУ. 2011. № 3 (17). С. 85–89.
7. Давыдов А. П., Ланцов А. Е., Ахмерова Г. М. Зависимость коэффициента расхода всасывающего отверстия круглого сечения от числа Re: сб. докладов международной научно-технической конф. «Теоретические основы расчета систем ТГВ» / МГСУ. М., 2013. С. 201–204.

8. Усманов Р. А., Давыдов А. П., Валиуллин М. А. Расчет воздухопроводов равномерной раздачи и всасывания с внутренними экранами, установленными под углом // Вестник КТУ. 2014. № 12. С. 138–140.
9. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 3 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 6. С. 58–65.
10. Kumada T., Hirota T., Tamura N., Ishiguro R. Heat and mass transfer with liquid evaporation into a turbulent air stream // Letters in Heat and Mass Transfer. 2012., № 1. P. 1–9.
11. Volchkov E. P. Concerning the heat and mass transfer features on permeable surfaces // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2013. P. 755–760.

**Davydov A.P.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [ap\\_Davidov@mail.ru](mailto:ap_Davidov@mail.ru)

**Valiullin M.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [posohin@kgasu.ru](mailto:posohin@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Method of calculation of suction air pipes with flow connection along the way (Method of flow coefficients)**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the work is to develop a methodology for calculating air-intake devices of various geometries for stationary and non-stationary operation modes.

*Results.* When removing harmful emissions from the process equipment used air inlets of various designs. The high efficiency of such devices depends on the accuracy of the calculation of these devices, providing a given volume of air being removed. The air flow rate is regulated by the air intake area by changing the flow coefficient, which is determined by the proposed calculation procedure.

*Conclusions.* Significance for the construction industry is the ability to calculate the air receiver device of any geometry for stationary and non-stationary modes.

**Keywords:** calculation technique of suction air ducts, uniformly suction air line, aperture, internal screen, flow coefficient.

#### **References**

1. Posohin V. N., Safiullin R. G., Broida V. A. Ventilation. M. : ASV, 2015. 624 p.
2. Posohin V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : AVOK-PRESS, 2008. 209 p.
3. Alshutl A. D. Hydraulic resistance. M. : Nedra, 1970. 248 p.
4. Davydov A. P., Valiullin M. A. The equation of motion of air in the ring evenly-suction air duct of variable cross section // Izvestiya KGASU. 2011. № 2 (16). P. 142–146.
5. Davydov A. P., Lantsov A. E., Akhmerova G. M. Work evenly - the suction plate with the holes of circular cross section // ООО «Scripta»2013. P. 461–465.
6. Davydov A. P., Valiullin M. A. Flow Coefficient suction slot with inner screen // Izvestiya KGASU. 2011. № 3 (17). P. 85–89.
7. Davydov A. P. Lantsov A. E., Akhmerova G. M. Dependence of the flow issasyvayuschego holes of circular cross section of the number Re: Proceedings of the International / MGSU. M., 2013. P. 201–204.
8. Usmanov R. A., Davydov A. P., Valiullin M. A. Calculation of the air ducts still – dimensional distribution and absorption of internal screens installed at an angle // Herald KТУ. 2014. № 12. P. 138–140.
9. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Varsegova E. V. The calculation of the pressure losses in local resistances. Message 3 // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2016. № 6. P. 58–65.
10. Kumada T., Hirota T., Tamura N., Ishiguro R. Heat and mass transfer with liquid evaporation into a turbulent air stream // Letters in Heat and Mass Transfer. 2012., № 1. P. 1–9.
11. Volchkov E. P. Concerning the heat and mass transfer features on permeable surfaces // Inter. J. Heat Mass Transfer. 2013. P. 755–760.



УДК 697.922.563+532.525.2

**Зиганшин А.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [amziganshin@kgasu.ru](mailto:amziganshin@kgasu.ru)

**Гимадиева Г.А.** – студент

E-mail: [guzelya30@yandex.ru](mailto:guzelya30@yandex.ru)

**Батрова К.Э.** – студент

E-mail: [kbatrova96@mail.ru](mailto:kbatrova96@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Потери давления и характеристики струи, выходящей через среднее боковое отверстие**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В работе приведены результаты численного исследования течения в канале с боковым отверстием, а также струи истекающей из такого отверстия. Несмотря на то, что такая ситуация часто встречается при конструировании воздухопроводов систем вентиляции и кондиционирования, данные о потерях давления в таком отверстии и в канале при проходе мимо него весьма скудны. Также не достаточно изучен вопрос о распространении такой струи.

*Результаты.* С использованием вычислительного комплекса *Fluent* получены закономерности изменения коэффициента местного сопротивления при выходе из среднего отверстия, а также при проходе мимо него от соотношения расходов воздуха. Найдены длины зон влияния вверх и вниз по потоку в канале. Определены все основные характеристики изотермической струи – кинематический коэффициент отверстия, угол наклона оси струи и аналитическое описание профиля продольной скорости в ее поперечных сечениях.

*Выводы.* Использование полученных закономерностей позволяет уточнить существующие методики расчета воздухораспределения, а также аэродинамического расчета систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

**Ключевые слова:** численное моделирование, среднее боковое отверстие, коэффициент местного сопротивления, угол истечения струи, профиль скорости, кинематический коэффициент отверстия, зона влияния.

Исследованию течений в каналах с отверстиями, а также закономерностей струй, выходящих из отверстий, посвящено много работ – справочники, использующиеся в проектировании в нашей стране [1, 2] и за рубежом<sup>1</sup>, научные монографии [3, 4], статьи [5]. Чаще всего они посвящены исследованию отверстий, расположенных в торце канала. Например в [2] представлены в основном экспериментальные данные о коэффициенте местного сопротивления (КМС) такого отверстия, а в работе [5] методом цифровой лазерной визуализации (*PIV, Particle Image Velocimetry*) определены профили скоростей, изменение осевой скорости в струе, истекающей из торца канала, показано хорошее согласование результатов с известными данными.

Лишь в немногих работах, например, в [4], авторы рассматривают вариант расположения выходного отверстия на боковой стенке канала, что очень распространено при организации воздухораспределения в помещениях. Здесь экспериментально определены КМС при проходе воздуха мимо среднего отверстия и при выходе струи через него. В [6] также экспериментально определяются характеристики течения при выходе струи через отверстия из канала со свободной поверхностью. Кроме экспериментальных, имеются работы, посвященные численным исследованиям различных струйных течений [7], где приведены характеристики прямой и слабо закрученной струй, истекающих из торцевого отверстия, а также работы, посвященные воздухораспределению в помещениях в целом (например, [8]). В более ранней работе авторов [9] численно исследуется истечение из бокового отверстия с разделением общего потока на две струйки – проходящую мимо

<sup>1</sup>Ashrae Handbook – Fundamentals (SI edition). 2005.

среднего отверстия и выходящую из него. Результаты численных расчетов по определению КМС приведены в виде доли энергии (полного давления), теряемой каждой из рассматриваемых струек, к энергии (динамическому давлению) соответствующей струйки. Такая запись более понятна физически, однако для удобства использования в проектировании КМС обычно представляются в виде отношения теряемого полного давления на участке, содержащем возмущающий элемент (ВЭ), к динамическому давлению общего потока без разделения на струйки. Кроме того важным является вопрос о длинах зон влияния (ЗВ) – расстояниях вверх и вниз по потоку от ВЭ, на котором из-за присутствия фасонной детали происходит возмущение потока воздуха.

Работа является продолжением исследований представленных в статье [9]. Кроме определения КМС, находятся характеристики истекающих из таких отверстий струй – угол наклона оси струи, кинематический коэффициент отверстия, профили продольной скорости в поперечных сечениях струи; определяются зоны влияния ВЭ.

Задача решается численно в двумерной постановке при помощи вычислительного комплекса *Fluent*. Геометрия расчетной области приведена на рис. 1а, там же показаны характерные профили продольной скорости и линии тока в струе при отношении расхода воздуха, выходящего из бокового отверстия  $G_{отв}$ , к суммарному расходу в канале  $G_{вх}$ ,  $G_{отв}/G_{вх} = 0,896$ . Размеры расчетной области  $2 \times 4$  м, ширина канала  $H = 0,1$  м, размер бокового отверстия  $h = 0,032$  м ( $\bar{h} = h/H = 0,32$ ). Граничные условия: *ABCDE* свободные проницаемые границы с избыточным давлением равным нулю; *AF*, *EI* и *GK* – твердые стенки. Входная граница – *AG*:  $G_{вх} = 1$  кг/с·м ( $Re = 8,2 \cdot 10^4$ ). Граница *IK* – выход потока из канала, который моделируется при помощи граничного условия с постоянным избыточным давлением. Изменением избыточного давления на границе *IK* создается необходимое соотношение расходов воздуха  $G_{отв}/G_{вх}$  в интервале от 0,1 до 0,9. На рис. 1б показано распределение безразмерного статического давления  $\bar{p}_c = 2 \cdot p / \rho \cdot u_{омв}^2$  ( $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>); безразмерный компонент скорости в выходном отверстии  $\bar{u}_x = u_x / u_{омв}$  и  $\bar{u}_y = u_y / u_{омв}$  (здесь  $u_{омв} = G_{отв} / \rho \cdot h$  – среднерасходная скорость на истечении из отверстия).

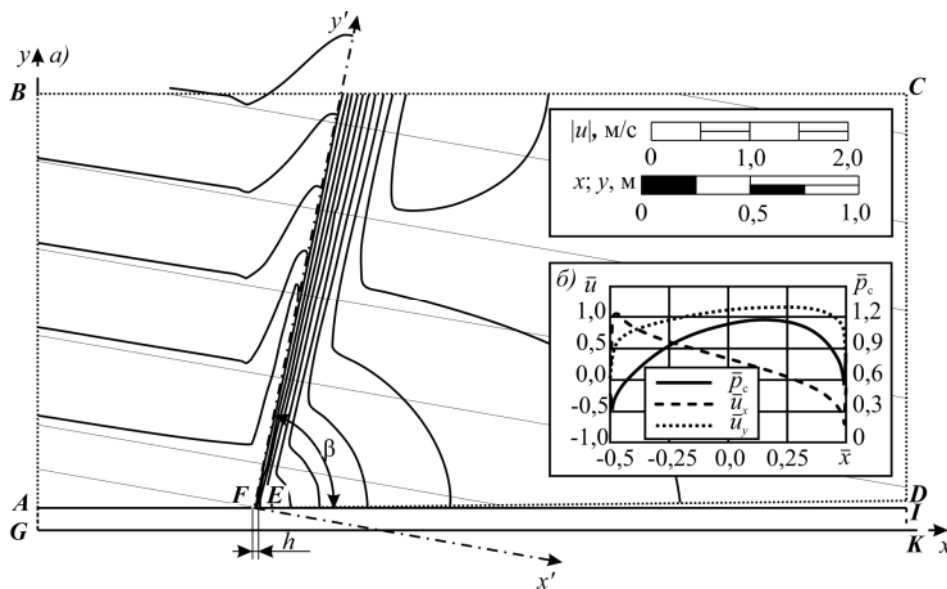


Рис. 1. Течение из среднего бокового отверстия:  
а) геометрия расчетной области и профили скорости  
в поперечных сечениях струи при  $G_{отв}/G_{вх} = 0,896$ ;  
б) распределение давления и компонент скорости в отверстии

Для замыкания системы уравнений движения жидкости используется «стандартная»  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, как наиболее подходящая при моделировании течения в канале и свободных струй [10]. Кроме модели турбулентности, необходимо выбрать наиболее подходящую пристеночную модель – «стандартные» пристеночные функции (*Standard Wall Functions – SWF*) или расширенное пристеночное моделирование

(*Enhanced Wall Treatments – EWT*). Одновременно производится и устранение «сеточной зависимости» путем адаптации расчетной сетки, то есть ее последовательное измельчение для предотвращения влияния размеров ячеек сетки на решение. Первые этапы измельчения сетки проводятся во всей расчетной области, а затем в пристеночных слоях и исследуемом боковом отверстии. В качестве параметра, характеризующего качество расчетной сетки в пристеночном слое, используются безразмерные расстояния  $y^*$  и  $y^+$  (для *SWF* и *EWT*, соответственно) [11]. В качестве контрольного параметра выбраны коэффициенты местного сопротивления (КМС) при истечении воздуха через боковое отверстие  $\zeta_{отв}$  и при проходе по каналу мимо отверстия  $\zeta_{пр}$ , которые определялись по, полученному из численного решения, распределению полного давления по длине канала с использованием соотношений:

$$\zeta_{отв} = \frac{P_{вх}^n - R_{вх} \cdot l_{вх}}{P_{вх}^d}; \tag{1}$$

$$\zeta_{пр} = \frac{P_{вх}^n - P_{вых}^n - R_{вх} \cdot l_{вх} - R_{пр} \cdot l_{пр}}{P_{вх}^d}, \tag{2}$$

здесь  $P_{вх}^n$  и  $P_{вых}^n$  – полные давления на входе в канал (граница **AG**) и на выходе из него (граница **БК**), Па;  $R_{вх}$  и  $R_{пр}$  – удельные потери давления на трение в канале до (на участке длиной  $l_{вх}$ ) и после ( $l_{пр}$ ) отверстия соответственно, Па/м;  $P_{вх}^d = \rho \cdot u_{вх}^2 / 2$  – динамическое давление потока на входе в канал, Па;  $u_{вх} = G_{вх} / \rho \cdot H$  – среднерасходная скорость воздуха на входе в канал, м/с.

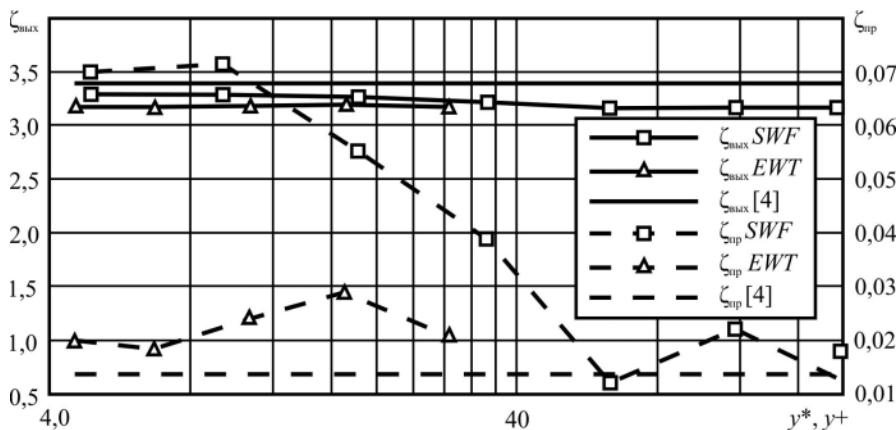


Рис. 2. Изменение  $\zeta_{отв}$  и  $\zeta_{пр}$  при измельчении сетки ( $y^*$  и  $y^+$ ) и при использовании разных способов пристеночного моделирования (*SWF* и *EWT*) для  $G_{отв}/G_{вх} = 0,263$

На рис. 2 показано изменение  $\zeta_{отв}$  и  $\zeta_{пр}$  в зависимости от параметров  $y^*$  и  $y^+$ . Здесь же нанесены результаты эксперимента [4]. Видно, что на значение сопротивления, при истечении из бокового отверстия  $\zeta_{отв}$ , используемая пристеночная модель и размер пристеночных ячеек расчетной сетки особого влияния не оказывают – отличие между численными и экспериментальными значениями не превышает 6,5 %. Значение КМС на проход мимо среднего отверстия  $\zeta_{пр}$  при использовании «стандартных» пристеночных функций (*SWF*) существенно зависит от размеров пристеночных ячеек, и дает результат, сравнимый с экспериментальными данными, при  $y^* > 60$ , тогда как при использовании расширенного пристеночного моделирования (*EWT*) воспроизводимые и удовлетворительно сравнимые с экспериментальными данными (отличие около 30 %) результаты получаются на всем исследованном диапазоне значений  $4 < y^+ < 30$ . Таким образом, эта модель позволяет использовать более мелкую сетку, что важно при моделировании истечения струи из небольшого отверстия.

Далее с использованием верифицированной выше компьютерной модели («стандартная» *k-ε* модель турбулентности в сочетании с расширенным пристеночным

моделированием (*EWT*) и расчетной сеткой с такими размерами ячеек, что  $y^+ \sim 4$ ) проводится численное определение зависимости  $\zeta_{отв}$  и  $\zeta_{пр}$  от отношения расхода воздуха, истекающего из отверстия  $G_{отв}$ , к общему расходу воздуха, проходящему по каналу  $G_{вх}$ . Результаты расчетов для  $G_{отв}/G_{вх} = 0,159; 0,263; 0,54; 0,652$  и  $0,896$  приведены на рис. 3. Для сравнения здесь также нанесены данные для бокового отверстия размером  $\bar{h}=0,32$  по результатам экспериментальных исследований [4] и из справочника, которым обычно пользуются при проектировании систем вентиляции [2].

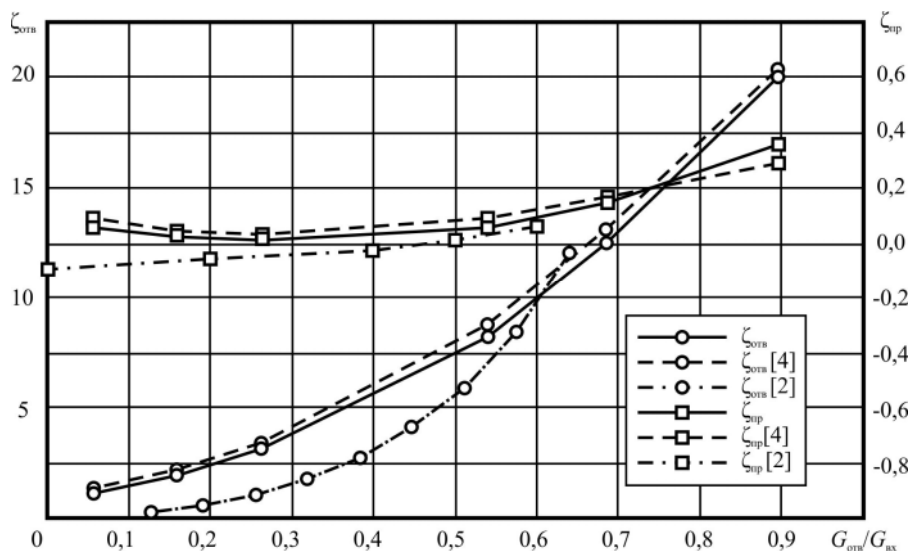


Рис. 3. Сравнение зависимости  $\zeta_{отв}$  и  $\zeta_{пр}$  от  $G_{отв}/G_{вх}$ , найденной численно, с данными В.Н. Талиева [4] и справочника проектировщика [2]

Видно хорошее совпадение результатов численного исследования с подробным экспериментом В.Н. Талиева, что говорит об адекватности используемой компьютерной модели и возможности ее использования для дальнейших исследований, в том числе параметров истекающей из отверстия струи. Имеется также удовлетворительное сходство с данными из справочника проектировщика, но здесь нужно отметить, что данные [2] представлены в виде отношения скоростей, и при пересчете отношений расходов на исследованный размер отверстия ограничены диапазоном  $0,1 < G_{отв}/G_{вх} < 0,6$ .

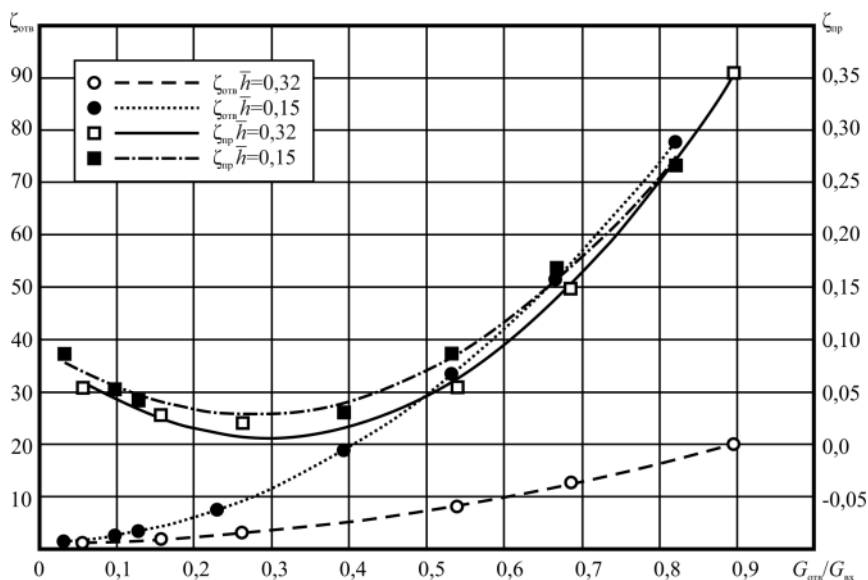


Рис. 4. Зависимости  $\zeta_{отв}$  и  $\zeta_{пр}$  от  $G_{отв}/G_{вх}$  для  $\bar{h}=0,15; 0,32$

На рис. 4 представлены результаты данного исследования и пересчет результатов работы [9] по формулам (1)-(2) для отверстия размером  $\bar{h}=0,15$ , а также их аппроксимация для удобства использования. Точками представлены результаты расчетов, а линиями – аппроксимации, для отверстия  $\bar{h}=0,15$  по формулам:

$$\zeta_{\text{пр}}=0,8274 \cdot (G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}})^2 - 0,4585 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 0,0918,$$

$$\zeta_{\text{отв}}=113,1 \cdot (G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}})^2 - 0,5482 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 1,4631,$$

и для отверстия  $\bar{h}=0,32$  – по формулам:

$$\zeta_{\text{пр}}=0,963 \cdot (G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}})^2 - 0,5734 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 0,0914,$$

$$\zeta_{\text{отв}}=21,574 \cdot (G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}})^2 + 1,7413 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 1,0979.$$

При проектировании важен и корректный учет взаимного влияния фасонных деталей как возмущающих элементов (ВЭ) сети. В частности, это касается вопроса определения КМС фасонных деталей, расположенных друг за другом. Очевидно, что каждый ВЭ имеет «зону влияния» (ЗВ) некоторого размера, за пределами которой их взаимное влияние не существенно, и КМС нескольких ВЭ может вычисляться сложением КМС каждого из них. Знание размеров ЗВ важно и при выборе мест размещения измерительной аппаратуры. Однако информация о длинах ЗВ довольно скудна.

К примеру, в ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ<sup>2</sup>, регламентирующем методы аэродинамических испытаний вентиляционных систем, места размещения мерных сечений указываются весьма приблизительно: на расстоянии не менее двух калибров перед местом возмущения потока и не менее шести калибров за ним.

В [1] приведены коэффициенты для учета взаимовлияния на КМС для некоторых фасонных деталей при различных сочетаниях, взаимной ориентации и относительном расстоянии между ними. В то же время результаты численного моделирования позволяют подробнее изучить течение, в том числе и на наличие возмущения потока перед фасонной деталью и после нее. При этом наиболее корректно оно определяется по распределению полного давления по длине канала с ВЭ [12, 13].

На рис. 5 приведена, найденная по результатам обработки численных расчетов, графическая зависимость размеров ЗВ до среднего бокового отверстия ( $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{Д}} = l_{\text{ЗВ}}^{\text{Д}}/h$ ) и после него ( $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{П}} = l_{\text{ЗВ}}^{\text{П}}/h$ ) от отношения расходов  $G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}}$ .

Можно видеть, что  $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{П}}$  примерно в 3 раза больше чем  $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{Д}}$ . Кроме того, обе длины увеличиваются при увеличении  $G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}}$ , что можно объяснить увеличением возмущения, вносимого потоком, вытекающим из отверстия. Зависимости практически линейны и могут быть аппроксимированы (с погрешностью не более 18 %) следующими формулами:

$$\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{Д}} = 0,951 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 0,3339 \text{ и } \bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{П}} = 3,309 \cdot G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}} + 0,4217.$$

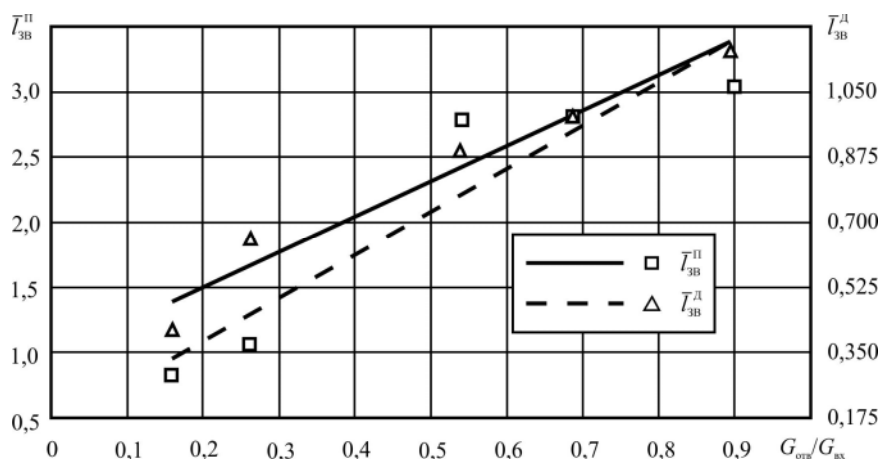


Рис. 5. Зависимость  $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{Д}}$  и  $\bar{l}_{\text{ЗВ}}^{\text{П}}$  от отношения расходов  $G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}}$

<sup>2</sup>ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. Постановление Госстандарта СССР от 05.09.1979.

Кроме течения в канале, были исследованы и характеристики струи истекающей из среднего бокового отверстия. Ось струи на начальном участке ( $y' < 0,9$ ) несколько искривлена, а далее на основном участке практически прямолинейна. Зависимость угла ее наклона от  $G_{отв}/G_{вх}$  на основном участке приведена на рис. 6. Там же нанесены значения углов наклона струи, определенные численно для отверстия  $\bar{h}=0,15$  в [9], и по результатам эксперимента [4]. Наблюдается согласие результатов численных и экспериментальных исследований.

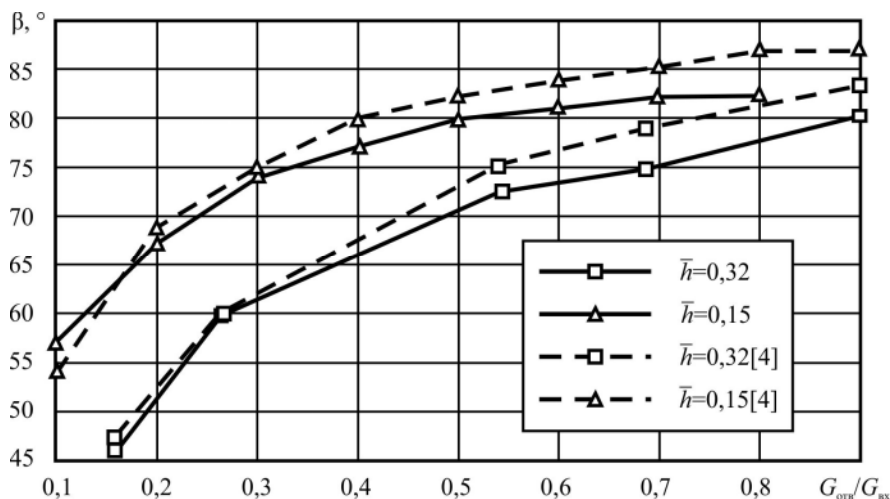


Рис. 6. Зависимость угла наклона оси струи от соотношения расходов  $G_{отв}/G_{вх}$

На рис. 7 приведены профили относительной продольной скорости  $u_y/u_{oc}$  для  $G_{отв}/G_{вх} = 0,236$ , где  $u_{oc}$  – значение продольной скорости на оси в данном поперечном сечении струи,  $y'$  – координата, направленная вдоль оси струи, а  $x'$  – поперек (рис. 1) для разных поперечных сечений в струе.

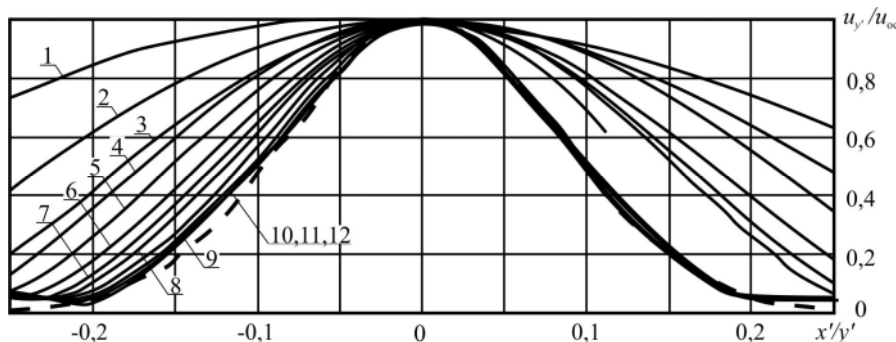


Рис. 7. Профили относительной скорости в поперечных сечениях струи при  $G_{отв}/G_{вх}=0,263$ :

- 1 –  $\bar{y}'=y'/h=3$ ; 2 –  $\bar{y}'=6$ ; 3 –  $\bar{y}'=9$ ; 4 –  $\bar{y}'=12$ ; 5 –  $\bar{y}'=16$ ; 6 –  $\bar{y}'=19$ ;
- 7 –  $\bar{y}'=25$ ; 8 –  $\bar{y}'=31$ ; 9 –  $\bar{y}'=44$ ; 10 –  $\bar{y}'=47$ ; 11 –  $\bar{y}'=56$ ; 12 –  $\bar{y}'=59$

Здесь же (штриховой линией) показан экспоненциальный профиль  $u_y/u_{oc} = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x'}{c \cdot y'}\right)^2}$  при значении экспериментальной константы  $c = 0,082$ , характерной для свободных турбулентных струй, истекающих из торцевых отверстий. Можно заметить некоторую несимметричность профилей, а также отсутствие подобия на участке  $\bar{y}' < 40$ , хотя профили достаточно хорошо описываются экспоненциальной зависимостью. Далее относительные профили становятся подобными.

На рис. 8 показан график изменения коэффициента  $c$  по длине струи. Его значение непостоянно по длине и изменяется в основном участке ( $25 < y'/h < 60$ ) в пределах  $0,115 < c < 0,087$ . Там же показано изменение относительной осевой скорости  $\bar{u}_{oc}=u_{oc}/u_0$  и

коэффициента  $m$ , характеризующего кинематические свойства струи, истекающей из отверстия, и зависящего от условий выхода и определяется по формуле:

$$m = \bar{u}_{oc} \sqrt{\frac{y'}{h}}, \tag{3}$$

где  $u_0 = G_{отв}/\rho \cdot h$  – среднерасходная скорость на истечении при данном соотношении расходов;  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

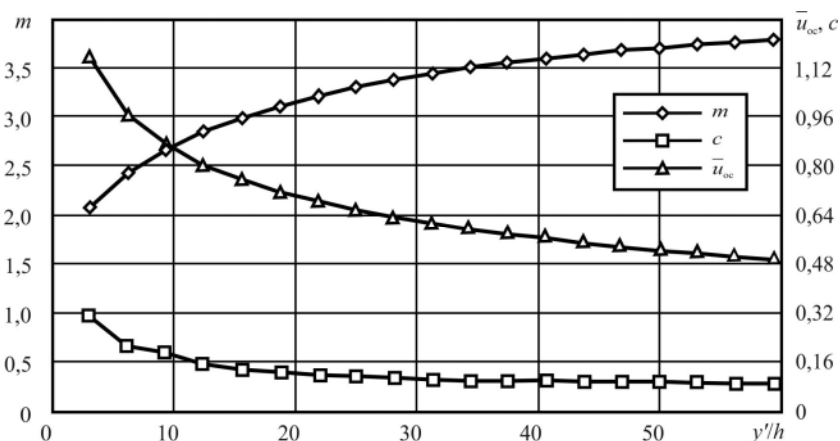


Рис. 8. Изменение безразмерной осевой скорости и коэффициентов  $m$  и  $c$  по длине струи при  $G_{отв}/G_{вх} = 0,263$

Среднее значение коэффициента  $m = 3,58$  (отклонение от среднего не более 5 %) было определено по основному участку, на котором его значения практически постоянны. Значение коэффициента  $m = 2,5$ , приведенное в [2] для прямоугольного щелевого отверстия при ненастилающейся струе, свидетельствует, что характеристики струи, истекающей из бокового отверстия, существенно различаются между собой.

На графике рис. 9 приведены результаты аналогичных вычислений, которые были проведены и для других соотношений расходов  $G_{отв}/G_{вх}$ . Видно, что коэффициент  $c$  не зависит от отношения расходов и имеет практически постоянное значение 0,095, а изменение кинематического коэффициента приточного насадка от отношения расходов можно описать линейной зависимостью:

$$m = -1,0425 \cdot G_{отв}/G_{вх} + 3,7769.$$

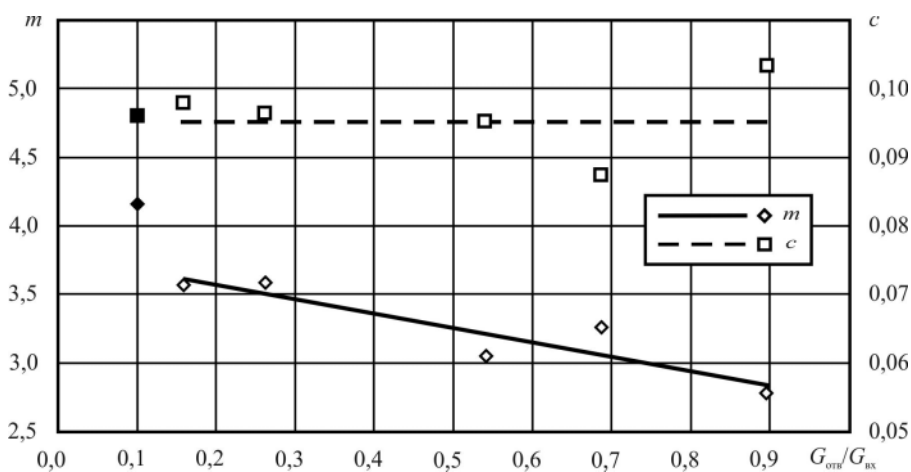


Рис. 9. Зависимость коэффициентов  $m$  и  $c$  от соотношения расходов

Здесь точками с зачернением показаны значения коэффициентов  $c$  и  $m$  для отверстия  $\bar{h} = 0,15$  [9].

### Заключение

Численно исследована компьютерная модель канала со средним боковым отверстием, которая хорошо описывает как течение внутри канала, так и истекающую в окружающее пространство струю. Полученные закономерности изменения сопротивления истечению из такого отверстия и течению мимо него по каналу хорошо согласуются с известными экспериментальными данными и предыдущими численными расчетами. Получены новые закономерности зон влияния возмущающего элемента в виде среднего бокового отверстия от отношения расходов  $G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}}$ , которые могут использоваться при проектировании систем вентиляции.

Постоянство коэффициента  $c$ , характеризующего профили продольной скорости в поперечных сечениях струи, говорит об их подобии, что характерно для турбулентных струй, а его несколько большее значение показывает, что такая струя чуть шире струи, истекающей из торцевого отверстия. Большее значение кинематического коэффициента  $m$  говорит о более медленном затухании такой струи, а его зависимость от  $G_{\text{отв}}/G_{\text{вх}}$  хорошо описывается линейным уравнением.

### Список библиографических ссылок

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Баркалов Б. В., Павлов Н. Н., Амирджанов С. С. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. М.: Стройиздат, 1992. 416 с.
3. Bradshaw P., Woods W. A. An Introduction to Turbulence and Its Measurement: Thermodynamics and Fluid Mechanics Series. 2<sup>nd</sup> ed.: Pergamon, 2013. 211 p.
4. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1954. 288 с.
5. Gori F., Petracci I., Angelino M. Flow evolution of a turbulent submerged two-dimensional rectangular free jet of air. Average Particle Image Velocimetry (PIV) visualizations and measurements // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc., 2013. Vol. 44. P. 764–775.
6. Hussain A., Ahmad Z., Asawa G.. Flow Through Side Square Orifices in Open Channels // ISH J. Hydraul. Eng. 2011. Vol. 17. P. 37–41.
7. Miltner M., Jordan C., Harasek M. CFD simulation of straight and slightly swirling turbulent free jets using different RANS-turbulence models // Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 89. P. 1117–1126.
8. Chen H. et al. Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment // Build. Environ. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 90. P. 37–50.
9. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 3 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 6. С. 58–65.
10. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. О численном определении характеристик приточного насадка // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 173–179.
11. Near-Wall Mesh Guidelines // Ansys Fluent 6.3 Documentation. URL: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf> (дата обращения: 12.07.2017).
12. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Мударисов Д. И. О протяженности зон влияния возмущающих элементов трубопроводных систем // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 121–126.
13. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Баталова А. В. К определению коэффициентов местных сопротивлений возмущающих элементов трубопроводных систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 9. С. 108–112.



**Ziganshin A.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [amziganshin@kgasu.ru](mailto:amziganshin@kgasu.ru)

**Gimadieva G.A.** – student

E-mail: [guzelya30@yandex.ru](mailto:guzelya30@yandex.ru)

**Batrova K.E.** – student

E-mail: [kbatrova96@mail.ru](mailto:kbatrova96@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **The pressure losses and the characteristics of the jet flowing through the middle lateral outlet**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The paper presents the results of a numerical study of the flow in a channel with a middle lateral supply outlet, and a jet flowing out of this orifice. Despite the fact that this situation is often encountered in the construction of ducts for ventilation and air conditioning systems, data on pressure losses in such orifice and in the channel when air passing it are very scarce. The question of distribution of such jet is also not sufficiently studied.

*Results.* With the use of the Fluent CFD software, the dependence of local resistance coefficient change at the exit from the lateral orifice, and when passing by it from the airflow ratio are obtained. The lengths of the upstream and downstream influence zones in the channel are found. All the main characteristics of an isothermal jet are determined: the kinematic coefficient of the supply outlet, the angle of inclination of the jet axis, and the analytical description of the longitudinal velocity profile in its cross sections.

*Conclusions.* The use of the obtained dependences allows to clarify the existing methods for calculating air distribution, as well as aerodynamic calculation of ventilation and air conditioning systems.

**Keywords:** numerical simulation, middle lateral supply outlet, local resistance coefficient, jet flow angle, velocity profile, kinematic coefficient of the supply outlet, impact zone.

#### **References**

1. Idelchik I. E. Handbook of hydraulic resistance. M. : Mashinostroenie, 1992. 672 p.
2. Barkalov B. V., Pavlov N. N., Amirjanov S. S. Internal sanitary equipment. Vol. 3. Ventilation and air conditioning. Book. 2. M. : Stroyizdat, 1992. 416 p.
3. Bradshaw, P., Woods W.A. An Introduction to Turbulence and Its Measurement: Thermodynamics and Fluid Mechanics Series. 2<sup>nd</sup> ed. : Pergamon, 2013. 211 p.
4. Taliev V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : Stroyizdat, 1954. 288 p.
5. Gori F., Petracci I., Angelino M. Flow evolution of a turbulent submerged two-dimensional rectangular free jet of air. Average Particle Image Velocimetry (PIV) visualizations and measurements // Int. J. Heat Fluid Flow. Elsevier Inc., 2013. Vol. 44. P. 764–775.
6. Hussain A., Ahmad Z., Asawa G. Flow Through Side Square Orifices in Open Channels // ISH J. Hydraul. Eng. 2011. Vol. 17. P. 37–41.
7. Miltner M., Jordan C., Harasek M. CFD Simulation of straight and slightly swirling turbulent free jets using different RANS-turbulence models // Appl. Therm. Eng. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 89. P. 1117–1126.
8. Chen H. Numerical investigation of the ventilation performance of different air supply devices in an office environment // Build. Environ. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 90. P. 37–50.
9. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Varsegova E. V. To calculate the pressure loss in local resistances. Report 3 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2016. № 6. P. 58–65.
10. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Varsegova E. V. On the numerical definition of the characteristics of the inlet nozzle // Izvestiya KGASU. 2017. № 1 (39). P. 173–179.
11. Near-Wall Mesh Guidelines // Ansys Fluent 6.3 Documentation. URL: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf> (reference date: 12.07.2017).
12. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Mudarisov D. I. On the extent of zones of influence of disturbing elements of pipeline systems, Izvestiya KGASU. 2014. № 2 (28). P. 121–126.
13. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Batalova A. V. To the determination of coefficients of local resistances of perturbing elements of pipeline systems // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2012. № 9. P. 108–112.



УДК 628.3

**Бусарев А.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [reder1@myrambler.ru](mailto:reder1@myrambler.ru)

**Селюгин А.С.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [a.selyugin@inbox.ru](mailto:a.selyugin@inbox.ru)

**Каюмов Ф.Ф.** – аспирант

E-mail: [kayum.91@mail.ru](mailto:kayum.91@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Ибатуллин Л.Х.** – старший диспетчер

E-mail: [amir-hana@mail.ru](mailto:amir-hana@mail.ru)

**Муниципальное унитарное предприятие «Водоканал» г. Казани**

Адрес организации: 420015, Россия, г. Казань, ул. Максима Горького, д. 34

### **К вопросу определения качества дождевых стоков на примере г. Казани**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследований – выявить качественные показатели дождевых стоков г. Казани, а также разработать технологию их очистки.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в определении физико-химических характеристик дождевых сточных вод г. Казани, анализ которых позволит предложить технологию их очистки.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что анализ качественных показателей дождевых стоков г. Казани позволил предложить технологию их очистки.

**Ключевые слова:** дождевые стоки, анализ, физико-химические характеристики, методы очистки, установки очистки, гидроциклонные установки.

Анализ проводившихся ранее исследований показывает, что основными видами загрязнений дождевых стоков являются твердые взвешенные вещества, нефтепродукты, а также органические соединений. При этом концентрация взвеси в дождевых сточных водах находится в пределах от 400 до 1500 мг/л, содержание нефтепродуктов достигает 90-120 мг/л, а их биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>полн</sub>) составляет 20-30 мг/л [1, 2].

Согласно современным нормативным требованиям необходима очистка дождевых стоков перед сбросом их в поверхностные источники. Обработка дождевых сточных вод с территории промышленных предприятий должна осуществляться на локальных очистных сооружениях [3]. Во многих крупных городах (Москва, Санкт-Петербург) очистка дождевых стоков производится не только при их сбросе в поверхностные источники, но и при их поступлении в городские системы водоотведения [1]. Таким образом, создание установок очистки дождевых сточных вод является актуальной научно-технической проблемой.

Для расчета и проектирования подобных установок необходимо знать качественные характеристики дождевых стоков. Для этой цели проведены исследования по изучению качественных показателей дождевых сточных вод г. Казани: из основных городских выпусков дождевых стоков в Куйбышевское водохранилище отбирались пробы, в которых определялись основные физико-химические показатели данных сточных вод. Концентрация взвешенных веществ определялась весовым методом по методике, изложенной в работе [4]. Содержание нефтепродуктов в дождевых стоках определялось фотоколориметрическим методом [2]. БПК<sub>полн</sub> дождевых сточных вод определялось по рекомендациям работы [4]. Температура сточной воды определялась с помощью спиртового термометра с ценой деления 0,1°С. Активная реакция среды исследовалась с помощью РН-метра [4]. Запах и прозрачность дождевых стоков оценивались по рекомендациям СанПиН 2.1.4.1074-01.

Таблица 1

**Физико-химические характеристики дождевых стоков**

Место отбора проб	Дата отбора проб	Физико-химические показатели					
		Температура, °С	рН	Концентрация взвеси, мг/л	Концентрация нефтепродуктов, мг/л	БПК <sub>полн</sub> , мг/л	Запах, баллы
1	2	3	4	5	6	7	8
Юдинская дамба, ДНС-1	05.09.16	+16,7	7,23	756	72	19	1 нефти
п. Кокушкино, Волжская дамба, ДНС-2	08.08.16	+18,1	6,83	885	85	21	1 нефти
Портовая дамба, ДНС-3	26.08.16	+17,5	7,14	1274	101	25	2 нефти
Кремлевская дамба, ДНС-4	15.09.16	+16,5	7,1	732	49	16	-
Федосеевская дамба, ДНС-5	08.09.16	+16,3	7,04	857	56	18	-
Нижнереченская дамба, ДНС-5	20.09.16	+15,9	6,71	625	39	19	-
Дамба «Верхняя плотина», ДНС-7	02.10.16	+15,7	6,92	587	68	22	1 нефти

Таблица 2

**Физико-химические характеристики дождевых стоков**

Место отбора проб	Дата отбора проб	Физико-химические показатели					
		Прозрачность, см	Щелочность, мг-экв/л	Жесткость, мг-экв/л	Сухой остаток, мг/л	Содержание хлоридов, мг/л	Содержание сульфатов, мг/л
9	10	11	12	13	14	15	16
Юдинская дамба, ДНС-1	05.09.16	10	4,2	4,8	183	97	46
п. Кокушкино, Волжская дамба, ДНС-2	08.08.16	8	3,1	5,5	195	110	54
Портовая дамба, ДНС-3	26.08.16	5	4,7	6,2	271	138	65
Кремлевская дамба, ДНС-4	15.09.16	8	3,3	3,7	194	95	31
Федосеевская дамба, ДНС-5	08.09.16	9	3,8	4,1	208	89	38
Нижне-реченская дамба, ДНС-5	20.09.16	11	3,7	4,0	179	101	42
Дамба «Верхняя плотина», ДНС-7	02.10.16	12	3,5	3,5	167	82	50

Жесткость определялась по методике, приведенной в работе [5]. Щелочность и сухой остаток дождевых сточных вод, а также содержание в них сульфатов и хлоридов определялись по методикам, приведенным в работе [4]. Результаты исследований характеристик дождевых стоков г. Казани представлены в табл. 1-2.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

а) концентрация загрязнений в дождевых сточных водах г. Казани в целом соответствует показателям литературных источников [1, 2];

б) содержание взвешенных веществ в дождевых стоках находится в пределах 625-1274 мг/л;

в) концентрация нефтепродуктов в дождевых стоках не превышает 39-101 мг/л;

г) БПК<sub>полн</sub> дождевых сточных вод достигает 16-25 мг/л;

д) температура дождевых стоков составляет +15,7...+18,1°С; она уменьшается при сезонном снижении температуры воздуха;

е) при наступлении дождливого периода концентрация загрязнений в дождевых стоках снижается;

- ж) активная реакция дождевых стоков находится в пределах 6,71-7,23, т.е. они являются практически нейтральными;
- и) дождевые сточные воды г. Казани практически не имеют запаха;
- к) прозрачность дождевых сточных вод составляет 5-12 см;
- л) щелочность дождевых сточных вод находится в пределах 3,1-4,7 мг-экв/л;
- м) жесткость дождевых стоков не превышает 4,0-6,2 мг-экв/л;
- н) концентрация хлоридов составляет 82-138 мг/л, сульфатов 31-65 мг/л;
- п) сухой остаток дождевых стоков не превышает 167-208 мг/л.

Для очистки ливневых стоков обычно применяются механические (отстаивание, фильтрование, гидроциклонная обработка) и физико-химические (коагуляция, флотация) методы [6, 7]. Для их глубокой очистки используются физико-химические (сорбция, ультрафильтрация) и биологические методы [1, 6].

В ряде случаев, для очистки ливневых стоков применяются моноблочные установки, в которых несколько различных устройств размещаются в одном контейнере. Данные установки обычно работают в безнапорном режиме. Известна установка типа КОС ЛС, предназначенная для очистки поверхностных стоков производительностью от 10 до 60 л/с [8]. Корпус данной установки изготовлен из спиралевитых труб марки ПНД диаметром 2,2 м. Внутри горизонтального корпуса выделяются успокоительная зона, зона отстаивания с тонкослойными блоками и зона адсорбционной очистки. Установка КОС ЛС монтируется в траншее на железобетонном фундаменте. Концентрация взвешенных веществ в поверхностных стоках после очистки снижается с 3000 до 3 мг/л, содержание нефтепродуктов – с 200 до 0,05 мг/л [8].

ООО «ВИТЭКО» производит установки «ВЕКСА», предназначенные для очистки ливневых стоков, которые сбрасываются в коллекторы водоотведения поверхностных стоков, а также «ВЕКСА-М» после которых очищенные дождевые сточные воды могут сбрасываться в поверхностные источники [9]. Установки типа «ВЕКСА» и «ВЕКСА-М» производительностью от 21 до 36 л/с моноблочные, а производительностью от 40 до 100 л/с двухблочные, состоящие из песконепфтеуловителя и сорбционного блока. Установки «ВЕКСА» позволяют снижать концентрацию взвешенных веществ в ливневых стоках с 1300 до 5 мг/л, нефтепродуктов – со 110 до 0,3 мг/л, а БПКполн – с 30 до 2 мг/л. Установки «ВЕКСА-М» позволяют снизить содержание нефтепродуктов до 0,05 мг/л [9]. Данные установки размещаются в траншее на железобетонном фундаменте. К их недостаткам следует отнести сложность их эксплуатации и ремонта (удаление осадка, замена отработанного сорбента).

Московский государственный технический университет (МГТУ) имени Н.Э. Баумана для очистки дождевых стоков предлагает надземные блочно-модульные очистные сооружения типа УОП-М производительностью от 1 до 20 м<sup>3</sup>/ч [10] в состав которых входят напорные флотаторы, реагентное хозяйство, механические и адсорбционные фильтры. Установка УОП-М позволяет очистить ливневые сточные воды по взвешенным веществам до 3 мг/л, а по нефтепродуктам – до 0,05 мг/л [10]. Данные очистные сооружения не имеют аппаратов предварительной очистки дождевых стоков от взвеси, поэтому во флотаторах будут накапливаться значительные объемы осадка.

Для удаления из дождевых стоков взвешенных веществ можно использовать отстойники различных конструкций (горизонтальные, радиальные, тонкослойные), а также нефтеловушки [6]. Для глубокой очистки дождевых сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ используются каркасно-засыпные фильтры с предварительной обработкой стоков реагентами [6, 7]. Хорошие результаты при доочистке дождевых стоков показывают фильтры с плавающей загрузкой [7].

В США широко применяется биологическая очистка поверхностных стоков с использованием биофильтров, биоконтакторов, мембранных биореакторов и очистных лагун [11].

В работе [12] приведен ряд гидроциклонных установок, предназначенных для очистки сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ.

Возможна очистка ливневых стоков от взвешенных веществ в напорных гидроциклонах различных конструкций [13-18].

ОАО «НИИ ВОДГЕО» разработана схема сооружений очистки ливневых стоков, [3], представленная на рис. 1. В состав сооружений входят: блок предварительной очистки 1, блок отстаивания 2, блок фильтрования 3 и блок доочистки 4. Загрязненные поверхностные стоки самотеком поступают в блок 1 по трубопроводу 5. Блок предварительной очистки 1 предназначен для удаления взвешенных веществ с гидравлической крупностью более 15 мм/с. Он представляет собой песколовку или аккумулирующий резервуар с предварительным осветлением стоков. Осадок, образующийся в блоке 1, отводится по трубопроводу 6 в песковые бункера [3].

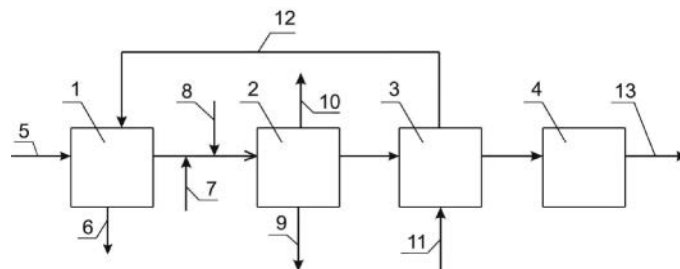


Рис. 1. Схема сооружений очистки дождевых стоков

Блок отстаивания 2 представляет собой нефтеловушку или тонкослойный отстойник. Для повышения эффективности в поверхностные стоки по линии 7 подается раствор коагулянтов, а по линии 8 – раствор флокулянтов. Осадок из блока 2 периодически отводится по трубопроводу 9, а уловленные нефтепродукты – по трубопроводу 10 [3].

Блок 3 представляет собой фильтровальную станцию, состоящую из скорых безнапорных (открытых) или напорных фильтров с зернистой загрузкой (кварцевый песок, антрацит гранитная крошка). Промывка фильтров осуществляется фильтратом, который подается в эти аппараты по трубопроводу 11. Загрязненные промывные стоки под остаточным давлением по трубопроводу 12 отводятся в аккумулирующий резервуар 1 [3]. Глубокая очистка поверхностных стоков от нефтепродуктов осуществляется в блоке 4. Он представляет собой либо адсорбционный фильтр, либо установку с мембранным разделением. Очищенные поверхностные стоки отводятся по трубопроводу 13.

Анализ качественных характеристик дождевых стоков г. Казани позволил предложить технологическую схему установки для их очистки, разработанную в Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ). Схема установки приведена на рис. 2.

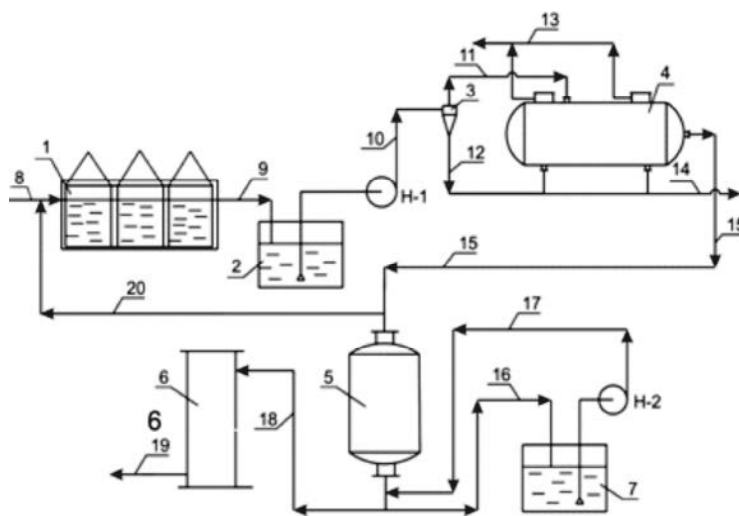


Рис. 2. Схема установки КГАСУ для очистки дождевых стоков

В состав установки очистки дождевых стоков входят: горизонтальная песколовка с «ложным» дном 1, промежуточная емкость 2, батарея напорных двухпродуктовых цилиндроконических гидроциклонов 3, напорный горизонтальный тонкослойный отстойник 4, скорые напорные фильтры с зернистой двухслойной загрузкой 5, напорные адсорбционные фильтры 6, резервуар для промывной воды 7 [1, 2]. Дождевые стоки самотеком по трубопроводу 8 поступают в песколовку 1, в которой осуществляется отделение от ливневых сточных вод наиболее крупных частиц взвеси. Очищенная вода из песколовки по трубопроводу 9 самотеком поступает в емкость 2, из которой она насосом Н-1 по трубопроводу 10 подается в батарею напорных гидроциклонов 3, в которых осуществляется очистка дождевых сточных вод от взвешенных веществ [1, 2]. Очищенная вода из верхнего слива гидроциклонов под избыточным давлением по трубопроводу 11 поступает на обработку в тонкослойный отстойник 4. Нижний слив гидроциклонов (сильно загрязненные взвешенными веществами стоки) под избыточным давлением отводится по трубопроводу 12.

В тонкослойном отстойнике 4 осуществляется очистка ливневых стоков от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Уловленные в отстойнике 4 нефтепродукты под избыточным давлением периодически удаляются по трубопроводу 13. Образующийся в отстойнике 4 осадок под избыточным давлением периодически удаляется по трубопроводу 14. Очищенная вода отводится из отстойника 4 под избыточным давлением по трубопроводу 15 на доочистку в напорные вертикальные фильтры 5, загруженные дробленым антрацитом или керамзитом, а также кварцевым песком. Промывка фильтров 5 осуществляется фильтратом, который поступает в резервуар 7 по трубопроводу 16. Вода на промывку фильтров 5 подается насосами Н-2 по трубопроводу 17. Очищенная вода из фильтров 5 под избыточным давлением по трубопроводу 18 поступает на глубокую очистку от нефтепродуктов в напорные адсорбционные фильтры 6. В качестве сорбента в них применяются древесные активированные угли. Очищенные дождевые стоки отводятся из адсорбционных фильтров 6 по трубопроводу 19. Промывная вода из фильтров по трубопроводу 20 отводится в начало сооружений.

Данная установка позволяет уменьшить концентрацию взвешенных веществ в дождевых сточных водах с 1200-1500 до 5 мг/л, содержание нефтепродуктов снизить с 90-120 до 0,5 мг/л, а БПК<sub>полн</sub> данных стоков снизить с 20-30 до 3-5 мг/л.

### Список библиографических ссылок

1. Адельшин А. Б., Бусарев А. В., Селюгин А. С. Исследование очистки поверхностных стоков // Вода: химия и экология. 2014. № 8. С. 113–117.
2. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Каюмов Ф. Ф. К вопросу очистки поверхностных стоков в гидроциклонных установках // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10. С. 229–232.
3. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в объекты. М. : ОАО «НИИ ВОДГЕО», 2014. 88 с.
4. Лурье Ю. Ю., Рыбникова А. И. Анализ производственных сточных вод. М. : Химия, 1984. 448 с.
5. Алексеев Л. С. Контроль качества воды. М. : Инфра-М, 2015. 159 с.
6. Карманов А. П., Палина И. Н. Технология очистки сточных вод. Сыктывкар : СЛИ, 2017. 207 с.
7. Лонданг Й., Розенвинкель К. Х. Очистка промышленных сточных вод. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 376 с.
8. Ливневые очистные сооружения с модифицированным активированным углем // Сайт «Очистные. ком». 2017. URL: <http://ochistnie.com/stormrunoff.html> (дата обращения: 26.06.2017).
9. Установки очистки ливневых, талых и производственных сточных вод ВЕКСа®, ВЕКСа-М®, Руководство по эксплуатации. Паспорт. Ростов: ООО «ВИТЭКО», 2017. 31 с.

10. Блочно-модульные ливневые очистные сооружения серии УОП-М // Сайт НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. URL: [http://voda-proekt.narod.ru/livn\\_oborud.html](http://voda-proekt.narod.ru/livn_oborud.html). (дата обращения: 26.06.2017).
11. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Гареев Б. М. К вопросу использования нанотехнологий для глубокой очистки сточных вод : сб. ст. мат. научно-практ. конф. – Prospects for the development of fundamental and applied science. Т. 2, Прага (Чешская Республика), 2016. С. 12–18.
12. Адельшин А. А., Адельшин А. Б., Урмитова Н. С. Гидродинамическая очистка нефтепромысловых сточных вод на основе применения закрученных потоков. Казань : КГАСУ, 2011. 245 с.
13. Zhu G., Liov J. L. Experimental study of particle separation and the fish-hook effect in a mini hydrocyclone // Chemical Engineering Science. Vol. 111. P. 94–105.
14. Dueck J., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone // Minerals Engineering. 2014. Vol. 62. P. 25–30.
15. Duesk J., Krokhina A., Minkov T. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of the hydrocyclone with water injection // Separation processes: summaries of 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA. Prague, Czech Republic, 2010. P. 800–801.
16. Dueck J., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection // Minerals Engineering. 2010. Vol. 23, № 4. P. 289–294.
17. Xu P., Wu Z., Mujumdar A.S., Yu B. Innovative hydrocyclone unlet desings to reduced wear in mineral dewatering processed. Dryng technology. 2011. v. 27. P. 1–11.
18. Nageswararao K., Medronho R.A. Fish hook effect in centrifugal classifiers – a further analysis // International Journal of Mineral Processing. 2014. Vol. 132. P. 43–58.

**Busarev A.V.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: [redel1@myrambler.ru](mailto:redel1@myrambler.ru)

**Selyugin A.S.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: [a.selyugin@inbox.ru](mailto:a.selyugin@inbox.ru)

**Kayumov F.F.** – post-graduate student

E-mail: [kayum.91@mail.ru](mailto:kayum.91@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Ibatullin L.H.** – senior dispatcher

E-mail: [amir-hana@mail.ru](mailto:amir-hana@mail.ru)

**Municipal Unitary Enterprise «Vodokanal» of Kazan**

The organization address: 420015, Russia, Kazan, Maksima Gorkogo st., 34

## The determination of the quality of rainwater runoff on the example of Kazan

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the research is to identify the qualitative indicators of rainwater in Kazan, as well as to develop a technology for their purification.

*Results.* The main results of the study are to identify the physico-chemical characteristics of the rainwater sewage of Kazan, the analysis of which will allow us to offer the technology to clean them.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is that the analysis of the qualitative indicators of rainwater in Kazan allowed to propose a technology for their purification.

**Keywords:** rainwater analysis, physico-chemical characteristics, methods of purification, purification plant, hydrocyclone installation.

## References

1. Adelshin A. B., Busarev A. V., Selyugin A. S. Study treatment of surface runoff // *Voda: chimiya and ecologiya*, 2014. № 8. P. 113–117.
2. Busarev A. V., Selyugin A. S., Kayumov F. F. To the question of clearance of surface sewage in hydrocyclone units // *Sovremennye naukoemkieologii*. 2016. № 10. P. 229–232.
3. Recommendations on designing the systems of collection, disposal and treatment of surface runoff from residential areas, enterprises, and determining the conditions of issue in its objects. M. : OAO «NII VODGEO», 2014. 88 p.
4. Lurie Y. Y., Rybnikova A. I. The analysis of industrial waste waters. M. : Chimiya, 1984. 448 p.
5. Alekseev L. S. Water quality monitoring. M. : Infra-M, 2015. 159 p.
6. Karmanov A. P., Palina I. N. Wastewater technology. Syktyvkar : SLI, 2017. 207 p.
7. Landing Y., Rosenvinkel K. H. The treatment of industrial waste waters. SPb. : Nauchnyie osnovy i tehnologii, 2012. 376 p.
8. Storm water treatment plants with modified activated carbon // Website «Ochistnie.com». 2017. URL: <http://ochistnie.com/stormrunoff.html> (reference date: 26.06.2017).
9. Installation cleaning of storm water, snowmelt and industrial wastewater VEKSA®, VEKSA-M®. Manual. Passport. Rostov : VITEKO, 2017. 31 p.
10. Modular stormwater treatment facilities a series of UOP-M // Website NIIEM MGTU im. N.E. Bauman. 2017. URL: [http://voda-proekt.narod.ru/livn\\_oborud.html](http://voda-proekt.narod.ru/livn_oborud.html). (reference date: 26.06.2017).
11. Busarev A. V., Selyugin A. S., Gareev B. M. To the use of nanotechnology for waste water treatment : proceedings of the scientific-practical conference. – Prospects for the development of fundamental and applied science. Vol. 2, Prague (Czech Republic), 2016. P. 12–18.
12. Adelshin A. A., Adelshin A. B., Urmitova N. S. And hydrodynamic cleaning of oil field wastewater on the basis of application of swirling flows. Kazan : KGASU, 2011. 245 p.
13. Zhu G., Liov J. L. Experimental study of particle separation and the fish-hook effect in a mini hydrocyclone // *Chemical Engeneering Science*. Vol. 111. P. 94–105.
14. Dueck J., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 62. P. 25–30.
15. Duesk J., Krokhina A., Minkov T. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of the hydrocyclone with water injection // *Separation processes: summaries of 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA*. Prague, Chech Republic, 2010. P. 800–801.
16. Dueck J., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection // *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23, № 4. P. 289–294.
17. Xu P., Wu Z., Mujumdar A. S., Yu B. Innovative hydrocyclone unlet desings to reduced wear in mineral dewatering processed. *Dryng technology*. 2011. v. 27. P. 1–11.
18. Nageswararao K., Medronho R. A. Fish hook effect in centrifugal classifiers – a further analysis // *International Journal of Mineral Processing*. 2014. Vol. 132. P. 43–58.



УДК 628.16

**Бусарев А.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [reder1@myrambler.ru](mailto:reder1@myrambler.ru)

**Шешегова И.Г.** – старший преподаватель

E-mail: [ig-7@mail.ru](mailto:ig-7@mail.ru)

**Низамова А.Х.** – старший преподаватель

E-mail: [Anizamova@mail.ru](mailto:Anizamova@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Подготовка технической воды для заводнения продуктивных нефтеносных горизонтов**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Для заводнения продуктивных горизонтов с целью повышения давления в нефтеносных пластах используются нефтепромысловые сточные воды, которые образуются в процессе подготовки и переработки сырой нефти. При недостаточных объемах нефтепромысловых стоков используется вода из поверхностных источников. Данная статья посвящена подготовке технической воды, которая применяется для закачки в нагнетательные скважины нефтепромыслов.

*Результаты.* В статье приведены данные по качественным показателям воды из поверхностных источников, используемой для заводнения нефтеносных горизонтов с целью повышения нефтеотдачи. Также здесь предложены технологические схемы установок, предназначенных для очистки воды из поверхностных источников от взвешенных веществ. Данные установки позволяют снизить концентрацию взвешенных веществ в очищенной воде до 10 мг/л.

*Выводы.* Исследования очистки технической воды от взвешенных веществ в напорных цилиндрических гидроциклонах, а также в гидроциклонных установках (блок гидроциклон-отстойник, гидроциклонно-фильтровальная установка) являются перспективными и имеют практическую значимость для нефтепромыслов РФ.

**Ключевые слова:** вода для заводнения нефтеносных горизонтов, вода для поддержания пластового давления, установка подготовки воды для заводнения нефтеносных горизонтов, гидроциклон, напорный горизонтальный отстойник, автоматизированная сверхскоростная фильтровальная станция, скорые напорные фильтры, гидроциклонно-фильтровальная установка.

С целью поддержания пластового давления (ППД) и повышения нефтеотдачи в настоящее время широко применяется метод заводнения нефтеносных горизонтов. Суть этого метода заключается в закачке в нефтяные пласты через нагнетательные скважины воды под высоким давлением. Для закачки используются нефтепромысловые сточные воды (НСВ), образующиеся в процессе добычи и подготовки нефти. В тех случаях, когда объемов НСВ не хватает, в систему ППД подается вода из поверхностных источников [1].

Опыт эксплуатации нагнетательных скважин показал, что для обеспечения их долговременной приемистости необходимо осуществлять очистку технической воды, закачиваемой в продуктивные нефтеносные горизонты, от твердых взвешенных веществ. Степень очистки этой воды от взвеси определяется индивидуально для каждого нефтяного месторождения. Так для нефтепромыслов Республики Татарстан (РТ) концентрация взвешенных веществ в технической воде, используемой в системах ППД, не должна превышать 10-50 мг/л [2]. Для нефтяных месторождений Республики Удмуртия эта концентрация достигает 30 мг/л [3].

На нефтепромыслы ОАО «Татнефть» вода для заводнения продуктивных горизонтов подается из р. Кама, точнее из Нижнекамского водохранилища. Забор воды осуществляется Камским водозабором, расположенным в г. Набережные Челны и принадлежащим ПАО «Татнефть» [4]. На Камском водозаборе имеются сооружения подготовки речной воды, обеспечивающие снижение концентрации взвешенных веществ

с 15-25 мг/л до 1,5-2 мг/л. Далее вода по трубопроводам подается на нефтяные промыслы, расположенные на расстоянии 90-120 км от реки Камы в Заинском, Альметьевском, Азнакаевском, Лениногорском, Сармановском и других районах РТ. В ходе длительной транспортировки камской воды наблюдается ее вторичное загрязнение: концентрация взвешенных веществ увеличивается до 10-30 мг/л, что может сделать эту воду непригодной для использования ее в системах ППД.

НГДУ «Воткинск» ОАО «Удмуртнефть» использует для заводнения продуктивных нефтеносных горизонтов воду из р. Сива. Концентрация взвешенных веществ в речной воде, поступающей на очистку достигает 400 мг/л. Расход технической воды, используемой НГДУ «Воткинск» ОАО «Удмуртнефть» составляет 1200 м<sup>3</sup>/сут [3].

Предполагаемая технологическая схема установки подготовки технической воды для НГДУ «Воткинск» представлена на рис. 1. В состав данной установки входят микрофильтры – 1, вихревые смесители – 2, горизонтальные отстойники – 3, оборудованные встроенным аэрофлокуляторами и полочными блоками, резервуар чистой воды (РЧВ) – 4, блок приготовления коагулянта – 5, блок приготовления флокулянта – 6, соединительные трубопроводы, запорно-регулирующая арматура, насосы и компрессоры.

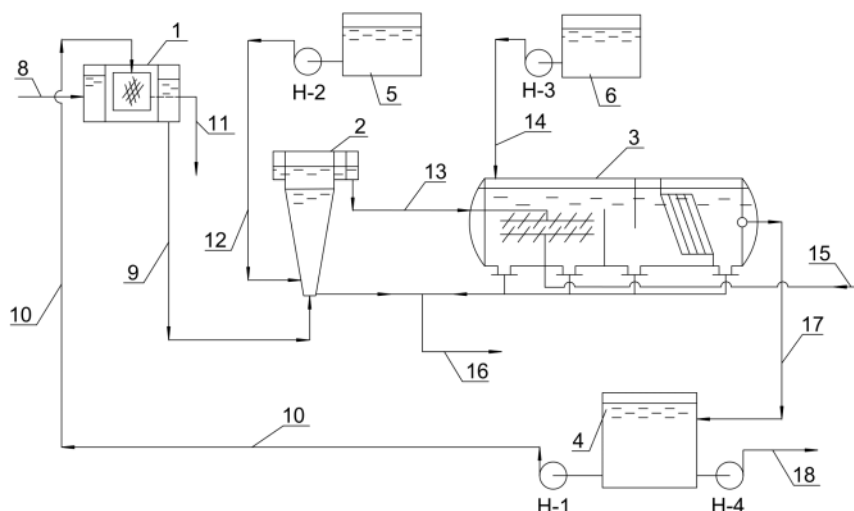


Рис. 1. Технологическая схема установки подготовки технической воды на водозаборе «Сива»

Работает установка подготовки технической воды водозабора «Сива» следующим образом. По трубопроводу – 8 вода с водопроводной насосной станции первого подъема (ВНС-1) поступает в микрофильтры – 1, откуда очищенная вода по трубопроводу – 9 самотеком подается в смесители – 2. Промывка микрофильтров осуществляется очищенной водой, которая из РЧВ подается насосами Н-1 по трубопроводу – 10. Загрязненная промывная вода отводится по трубопроводу – 11 на сооружения обработки промывных стоков.

В блоке – 5 готовится водный раствор коагулянта, в качестве которого используется реагент типа «Аква-Аурат-30». Раствор коагулянта подается в вихревые смесители – 2 насосом-дозатором Н-2 по трубопроводу – 12.

Обработанная коагулянтом вода по трубопроводу – 13 подается в отстойники – 3.

В блоке – 6 также готовится раствор флокулянта, в качестве которого используется реагент типа «Праестол 2515». Раствор коагулянта подается в отстойник – 3 насосом-дозатором Н-3 по трубопроводу – 14. Перемешивание обрабатываемой воды с флокулянтом осуществляется в аэрофлокуляторах отстойников – 3, куда по трубопроводу – 15 подается сжатый воздух от компрессоров.

Осадок, образующийся в отстойниках – 3, и шлам из вихревых смесителей – 2 по трубопроводу – 16 поступает в сгуститель, откуда он отводится на обезвоживание в вакуум-фильтрах.

Очищенная вода из отстойников 3 по трубопроводу 17 поступает в РЧВ, откуда насосами Н-4 она по трубопроводу 18 подается в систему ППД.

Недостатком данной технологической схемы является наличие сложного реагентного хозяйства. Обработка воды реагентами (коагулянтами и флокулянтами) повышает эксплуатационные расходы на подготовку технической воды.

Возможна безреагентная подготовка речной воды с использованием для ее очистки от взвешенных веществ напорных цилиндрических двухпродуктовых гидроциклонов [5]. За рубежом также ведутся исследования очистки воды от взвешенных веществ в гидроциклонах различных конструкций [6-9].

Более высокая эффективность очистки воды от взвешенных веществ может быть достигнута при использовании аппаратов типа «блок гидроциклон – отстойник» (БГО). Они состоят из напорных гидроциклонов и отстойников различных конструкций [2, 10]. Процессы очистки природных и сточных вод в напорных двухпродуктовых цилиндрических гидроциклонах в течение целого ряда лет ведутся в Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ) [2, 10].

В напорном гидроциклоне под действием сил центробежного поля, возникающего за счет тангенциального ввода жидкости в этот аппарат, взвешенные вещества, как более тяжелая фаза, отбрасываются к стенкам корпуса гидроциклона и вместе с частью воды выносятся через его нижнее сливное отверстие. Очищенная вода вместе с частью взвешенных веществ восходящим аксиальным потоком выносятся через верхнее сливное отверстие напорного гидроциклона. Если вода со сливов гидроциклонов поступает в резервуар, работающий под избыточным давлением, то считается, что эти аппараты работают с противодействием на сливах. Если же вода со сливов изливается в атмосферу или в резервуар, работающий в безнапорном режиме, то считается, что гидроциклон работает со свободным изливом [2, 5, 10].

Давление на входах в гидроциклон должно быть больше противодействия на его сливах не менее, чем на 0,2 МПа ( $2 \text{ кгс/см}^2$ ) [2, 10].

Эффект очистки технической воды в напорных двухпродуктовых цилиндрических гидроциклонах конструкции КГАСУ от взвешенных веществ достигает 55-65 % при работе этих аппаратов с противодействием на сливах [11].

Для очистки речной воды от взвеси в КГАСУ разработана еще одна напорная гидроциклонная установка [12]. Ее технологическая схема представлена на рис. 2. В состав этой установки входят батарея гидроциклонов – 1, состоящая из нескольких аппаратов конструкции КГАСУ, напорных горизонтальных отстойников – 2, оборудованных тонкослойными блоками, автоматизированной сверхскоростной фильтровальной станции (АСФС), состоящей из отдельных вертикальных сверхскоростных фильтров – 3, резервуара чистой воды – 4, трубопроводов, насосов, компрессоров и запорно-регулирующей арматуры.

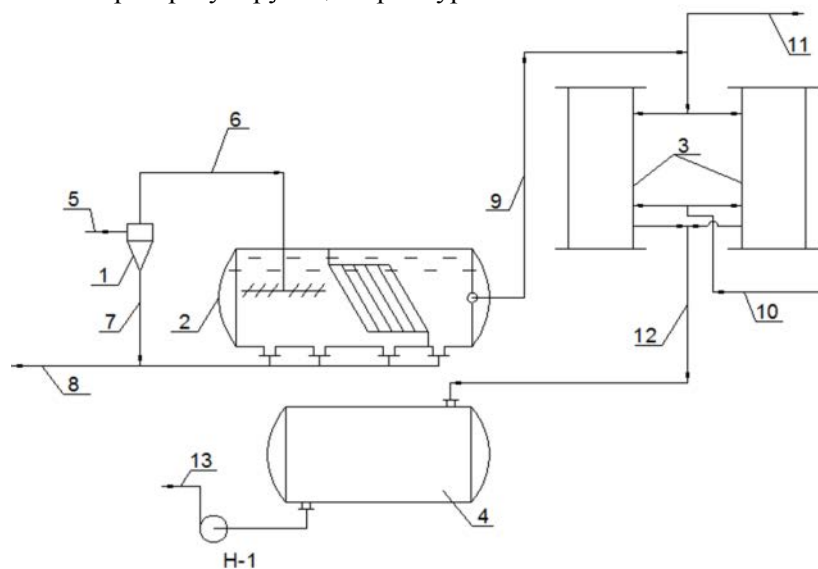


Рис. 2. Технологическая схема гидроциклонной установки подготовки технической воды

После обработки речной воды в напорных цилиндрикоконических гидроциклонах, в которые она под давлением подается по трубопроводу – 5, очищенная вода (верхний слив гидроциклонов) под избыточным давлением по трубопроводу – 6 подается в отстойники – 2, а вода сильно загрязненная взвешенными веществами (нижний слой гидроциклонов) отводится под избыточным давлением по трубопроводу – 7 в шламонакопитель.

Осадок, образующийся в отстойниках – 2, под избыточным давлением периодически отводится по трубопроводу 8 в шламонакопитель, из которого он подается на обезвоживание.

Доочистка технической воды осуществляется в АСФС, куда вода из отстойников – 2 под избыточным давлением поступает по трубопроводу – 9.

Сверхскорые фильтры загружены кварцевым песком. Фильтрация в них осуществляется в направлении сверху вниз.

Для регенерации загрузки сверхскорых фильтров – 3 применяется водовоздушная промывка, для чего в эти аппараты от компрессоров по трубопроводу – 10 подается сжатый воздух. Промываются фильтры – 3 очищенной водой (фильтратом), которая подается на промываемый фильтр из работающих фильтров [13].

Загрязненная промывная вода под остаточным давлением по трубопроводу – 11 отводится в блок обработки промывных стоков. Очищенная вода из АСФС под остаточным давлением по трубопроводу поступает в РЧВ, откуда она насосами Н-1 по трубопроводу – 13 подается в систему ППД.

Описанная выше установка позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ в речной воде с 1000 мг/л до 10 мг/л.

Подобная технологическая схема была предложена для очистки речной воды для нужд Бугульминского фарфорового завода (г. Бугульма).

Данная технологическая схема подготовки технической воды не требует применения реагентов, что значительно снижает эксплуатационные затраты. Предлагаемая установка достаточно компактна, легко автоматизируется, для промывки сверхскорых фильтров не требуется резервуар для промывной воды и специальные насосы для ее подачи на регенерацию загрузки данных аппаратов [13].

Для подготовки технической воды (ее очистки от взвеси), которая закачивается в нефтеносные продуктивные горизонты, может быть использована гидроциклонно-фильтровальная установка (ГФУ) [14]. Технологическая схема ГФУ, разработанная в ГФУ, представлена на рис. 3.

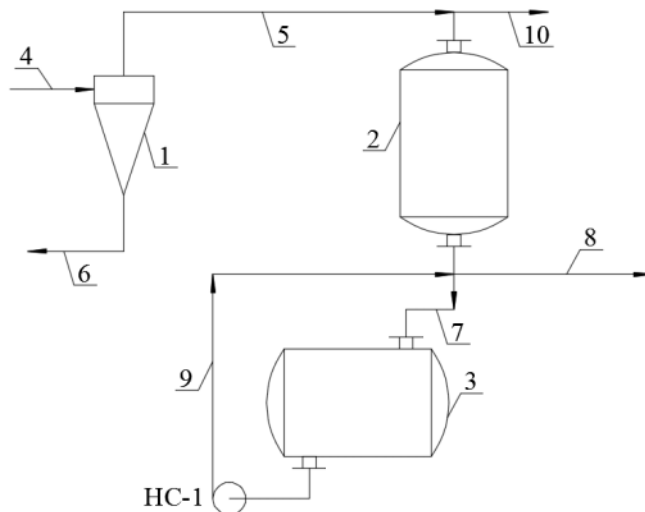


Рис. 3. Технологическая схема ГФУ

Вода на очистку подается под избыточным давлением по трубопроводу – 4 в напорные гидроциклоны – 1. После обработки ее в этих аппаратах верхний слив гидроциклонов (очищенная вода) под избыточным давлением по трубопроводу – 5

подается в скорые напорные фильтры – 2. Вода в них движется сверху вниз. В качестве загрузки применяются дробленый керамзит или антрацит и кварцевый песок.

Нижний слив гидроциклонов под избыточным давлением отводится по трубопроводу – 6.

Часть очищенной воды из фильтров – 2 под остаточным давлением по трубопроводу – 7 поступает в емкость – 3, а часть – по трубопроводу – 8 отводится в систему ППД.

Промывка фильтров – 2 осуществляется водой, которая подается в эти аппараты насосами Н-1 по трубопроводу – 9. Загрязненная промывная вода под остаточным давлением отводится от фильтров – 2 по трубопроводу – 10.

Установка типа ГФУ позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ в воде с 110-130 мг/л до 10 мг/л.

Применение гидроциклонных установок для подготовки технической воды позволяет повысить эффективность ее очистки от взвешенных веществ.

### Список библиографических ссылок

1. Шешегова И. Г., Бусарев А. В., Нестеров Н. В. Некоторые аспекты подготовки технической воды для заводнения нефтеносных горизонтов : сб. докладов XII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН Яковлева С. В. Яковлевские чтения / МГСУ. М., 2017. С. 217–220.
2. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Шешегова И. Г., Урмитова Н. С. Гидроциклонные установки подготовки воды для заводнения нефтеносных горизонтов с целью повышения их нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. 2015. № 4. С. 199–215.
3. Шешегова И. Г., Бусарев А. В., Галаялтинова Ф. Ф. Подготовка воды для целей заводнения нефтяных пластов Мишкинского нефтяного месторождения НГДУ «Воткинск» ОАО «Удмуртнефть» : сб. научных трудов 65-ой Всероссийской научной конференции / КГАСУ. Казань, 2013. С. 158–159.
4. Адельшин А. Б., Бусарев А. В., Селюгин А. С. К вопросу совершенствования систем водоснабжения территорий Республики Татарстан : сб. материалов II Конгресса – Чистая вода. Казань / Выставочный центр «Казанская ярмарка». Казань, 2011. С. 89–91.
5. Найденко В. В. Применении математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах. Горький : Волго-Вятское книжное изд-во, 1976. 287 с.
6. Zhu G., Liow I. L. Experimental Study of particle separation and the fishhook effect in mini-hydrocyclone // Chemical engineering science. 2014. V. 111. P. 94–105.
7. Dueck I., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone. // Minerals Engineering. 2014. V. 62. P. 289–294
8. Dueck I., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection // Minerals Engineering. 2011. V. 23. № 4. P. 289–294
9. Minkov L., Dueck I., Neesse Th. Computer simulations of the fish-hook effect in hydrocyclone separation // Minerals Engineering. 2014. V. 62. P. 19–24.
10. Адельшин А. А., Адельшин А. Б., Урмитова Н. С. Гидродинамическая очистка нефтепромысловых сточных вод на основе применения закрученных потоков. Казань : КГАСУ, 2011. 245 с.
11. Адельшин А. Б., Бусарев А. В., Селюгин А. С., Гареев Б. М., Манвелян Ш. Г. Исследование процессов очистки поверхностных стоков // Вода, химия и экология. 2014. № 8. С. 113–117.
12. Кожуков И. В., Бусарев А. В., Шешегова И. Г. Разработка установки подготовки воды для заводнения нефтяных пластов : сб. науч. тр. по материалам международной научно-практической конференции – Наука и образование в жизни современного общества в 14 томах: том 2. Тамбов : Консалтинговая компания «ЮКОМ», 2015. С. 65–67.

13. Адельшин А. Б., Барлев А. А. Автоматизация установки скоростных методов очистки вод. Казань : КИСИ, 1993. 88 с.
14. Фоминых А. М., Попков Н. С. Частичное осветление воды по схеме «Гидроциклон – скорый фильтр» // Промышленная энергетика. 1971. № 11. С. 33–41.

**Busarev A.V.** – candidate of technical sciences, assistant professor

E-mail: [reder1@myrambler.ru](mailto:reder1@myrambler.ru)

**Sheshegova I.G.** – senior lecturer

E-mail: [ig-7@mail.ru](mailto:ig-7@mail.ru)

**Nizamova A.Kh.** – senior lecturer

E-mail: [Anizamova@mail.ru](mailto:Anizamova@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Preparation of technical water for flooding productive of oil-bearing horizons**

#### **Abstract**

*Problem statement.* To flood productive horizons in order to increase the pressure in oil-bearing formations, oilfield wastewater is used, which are formed during the preparation and processing of crude oil. With insufficient volumes of oilfields, water from surface sources is used. This article is devoted to the preparation of technical water, which is used to inject oil fields into injection wells.

*Results.* The article presents data on qualitative indicators of water from surface sources used to flood oil-bearing horizons in order to improve oil recovery. Also, technological schemes of plants designed for water purification from surface sources from suspended solids are proposed here. These plants allow reducing the concentration of suspended solids in purified water to 10 mg / l.

*Conclusions.* Studies of the purification of technical water from suspended solids in pressure cylindrical hydrocyclones, as well as in hydrocyclone units (hydrocyclone-sedimentation unit, hydrocyclone-filter unit) are promising and of practical significance for Russian oilfields.

**Keywords:** water for flooding of oil-bearing horizons, water to maintain reservoir pressure, a water treatment plant for flooding oil-bearing horizons, a hydrocyclone, a pressure horizontal settler, an automated ultra-high speed filter station, fast pressure filters, a hydrocyclone filter unit.

#### **References**

1. Shesheva I. G., Busarev A. V., Nesterov N. V. Some aspects of preparation of technical water for water flooding of oil-bearing horizons: dig. of art. of the XII International scientific and technical conference, dedicated to the memory of academician RAS Yakovlev S. V. Yakovlev's readings / MSSU. M., 2017. С. 217-220.
2. Busarev A. V., Selyugin A. S., Sheshcheva I. G., Urmitova N. S. Hydrocyclone water treatment plants for water flooding of oil-bearing horizons with the purpose of increasing their oil recovery // Neftegazovoye delo. 2015. № 4. P. 199–215.
3. Shesheva I. G., Busarev A. V., Galyaltdinova F. F. Water treatment for oil flooding of the Mishkinskoye oil field of the NGDU «Votkinsk» OJSC «Udmurtneft» : dig. of art. of the 65th All-Russian scientific conference / KSUAE. Kazan, 2013. pp. 158-159.
4. Adelshin A. B., Busarev A. V., Selyugin A. S. To the question of improving of water supply systems in the territories of the Republic of Tatarstan: proceedings of the II Congress - Pure water. Kazan / Exhibition Center «Kazan Fair». Kazan, 2011. С. 89-91.
5. Naidenko V. V. Application of mathematical methods and computers for optimization and control of processes of separation of suspensions in hydrocyclones. Gorky : Volg-Vyatskoe knizhnoe izd-vo, 1976. 287 p.

6. Zhu G., Liow I. L. Experimental Study of particle separation and the fishhook effect in mini-hydrocyclone // *Chemical engineering science*. 2014. V. 111. P. 94–105.
7. Dueck I., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone. // *Minerals Engineering*. 2014. V. 62. P. 289–294
8. Dueck I., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection. – *Minerals Engineering*. 2011. V. 23. № 4. P. 289–294
9. Minkov L., Dueck I., Neesse Th. Computer simulations of the fish-hook effect in hydrocyclone separation // *Minerals Engineering*. 2014. V. 62. P. 19–24.
10. Adelshin A. A., Adelshin A. B., Urmitova N. S. Hydrodynamic cleaning of oilfield sewage based on the use of swirling flows. Kazan : KGASU, 2011. 245 p.
11. Adelshin A. B., Busarev A. V., Selyugin A. S, Gareyev B. M., Manvelyan Sh. G. Investigation of the processes of surface of runoff purification // *Voda, himiya i ehkologiya*. 2014. № 8. С. 113–117.
12. Kozhukov I. V., Busarev A. V., Shesheva I. G. Development of a water treatment plant for flooding oil reservoirs // *Science and education in the life of modern society: dig. of art. of the international scientific and practical conference in 14 volumes: V. 2*. Tambov : Consulting company «YUKOM», 2015. P. 65–67.
13. Adelshin A. B., Barlev A. A. Automation of installation of high-speed methods of water purification. Kazan : KISI, 1993. 88 p.
14. Fominykh A. M, Popkov N. S. Partial clarification of water according to the scheme «Hydrocyclone – fast filter» // *Promyshlennaya ehnergetika*. 1971. № 11. P. 33–41.



УДК 691.32

**Богданов Р.Р.** – ассистент

E-mail: [bogdanov.r.r@yandex.ru](mailto:bogdanov.r.r@yandex.ru)

**Ибрагимов Р.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [rusmag007@yandex.ru](mailto:rusmag007@yandex.ru)

**Потапова Л.И.** – кандидат химических наук, доцент

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Исследование взаимодействия компонентов комплексного модификатора методом ИК-спектроскопии**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования установить природу взаимодействий между компонентами комплексного модификатора (гиперпластификатором на основе эфиров поликарбоксилата, гидрофобизатора на основе силиконатов калия и метакаолина), а также влияние комплексного модификатора на свойства цементного камня с применением метода ИК-спектроскопии.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что в присутствии комплексного модификатора отмечается более высокая степень закристаллизованности гидросиликатов кальция, что обуславливает высокие физико-механические характеристики модифицированного самоуплотняющегося бетона. Выявлено, что предварительное перемешивание гиперпластификатора и водорастворимого гидрофобизатора в составе комплексного модификатора при предварительном его приготовлении не только не уменьшает эффективность модификаторов, но и связывает их в единый компонент. Установлено, что происходит хемосорбция связей СН-групп гиперпластификатором. При этом введение метакаолина в состав комплексного модификатора приводит к химическому взаимодействию его компонентов с конверсией связей С-Н в иные структуры, очевидно, химически связанные с метакаолином.

*Выводы.* Научная и практическая значимость результатов работы для строительного материаловедения и строительной отрасли заключается в установлении эффективности предварительного смешивания гиперпластификатора и гидрофобизатора при приготовлении комплексных добавок.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, ИК-спектроскопия, гиперпластификатор, гидрофобизатор, метакаолин, комплексный модификатор.

#### **Введение**

В настоящее время актуальным является получение высокофункциональных долговечных бетонов. Применение таких бетонов возможно в качестве гидроизоляционного слоя плоских кровель зданий. При этом помимо оптимизации фракционного состава заполнителей и рационального подбора состава бетона, приоритетной является задача формирования структуры цементного камня, обладающей высокой плотностью, низкой капиллярной пористостью и состоящей преимущественно из стабильных низкоосновных гидратных фаз [1-4]. Одним из простых и эффективных способов повышения свойств цементных композиций, является введение комплексных модификаторов содержащих эффективные суперпластификаторы, гидрофобизирующие добавки и активные минеральные добавки. Обзор и анализ литературных данных по исследованию данных компонентов выявил следующие их особенности.

Эффективный суперпластификатор является неотъемлемым компонентом самоуплотняющегося бетона (СУБ) [5]. Данный модификатор позволяет не только увеличить подвижность бетонной смеси при низком водоцементном отношении, но и получить бетоны с высокой прочностью, плотностью и долговечностью. При этом наиболее эффективными являются суперпластификаторы последнего поколения на основе эфиров поликарбоксилата [6-8, 13].



Повышение морозостойкости, водонепроницаемости и стойкости к агрессивному воздействию внешней среды можно добиться путем введения гидрофобизирующих добавок [9-11]. Особый интерес представляют кремнийорганические жидкости на основе силиконатов натрия и калия. При этом необходимо учитывать замедление гидратации цементного камня при высоких дозировках гидрофобизатора из-за образующейся гидрофобной пленки на поверхности реагирующих частиц и препятствующей гидратации в начальный период [12].

С целью оптимизации гранулометрического состава СУБ и не допущения водоотделения и расслоения бетонной смеси, необходимо вводить в его состав тонкодисперсные компоненты. В качестве такого компонента используют каменную муку, микрокремнезем, золу уноса, золу рисовой шелухи, тонкомолотый кварцевый песок и метакраолин. Среди вышеперечисленных добавок ученые особо выделяют метакраолин [14-16], являющийся целевым продуктом и имеющим стабильный состав и свойства. Также метакраолин обладает пуццолановым эффектом, так как вступает в реакцию на поздних этапах твердения с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и тем самым повышает коррозионную стойкость и прочность цементного камня [17, 18].

Авторами разработан комплексный модификатор для самоуплотняющегося бетона, включающий: гиперпластификатор – 1,5 %, гидрофобизатор – 0,15 %, метакраолин – 5 % от массы цемента. Оптимизация компонентов комплексного модификатора показана в работах [19, 20]. Новизна данного решения подтверждается патентом РФ [24].

Эффективным и простым способом достижения полифункционального эффекта и полной реализации потенциала всех компонентов, является применение комплексных добавок. Известны работы Изотова В.С., Каприелова С.С., Калашникова В.И., Крамар Л.Я., Хозина В.Г., Шейнфельд А.В. по исследованию влияния комплексных добавок, включающих пластификаторы и активные минеральные добавки (АМД), на процессы гидратации и структурообразования цементного камня [2, 17-18, 21-22, 25, 27], а также работы Батракова В.Г. по исследованию комплексов, включающих суперпластификатор и гидрофобизатор [12]. Однако малоизученными остаются комплексы содержащие пластификатор на основе эфира поликарбоксилата, кремнийорганический гидрофобизатор и метакраолин, в качестве АМД. Таким образом, научный интерес представляет изучение влияния суперпластификатора, гидрофобизатора и метакраолина в составе комплексного модификатора на прочность, особенности формирования микроструктуры и фазового состава цементного камня, а также связи взаимодействий между компонентами комплексного модификатора.

Результаты исследования влияния комплексного модификатора и его компонентов на прочность, особенности формирования микроструктуры и фазового состава цементного камня показаны в работе [28]. Цель данной работы – выявление природы взаимодействия между компонентами комплексного модификатора (гиперпластификатором на основе эфиров поликарбоксилата, гидрофобизатора на основе силиконатов калия и метакраолина) и влияние комплексного модификатора на процессы структурообразования цементного камня.

Для изучения данных особенностей взаимодействия между компонентами комплексного модификатора необходимо решить следующие задачи:

- исследовать образцы, содержащие компоненты комплексного модификатора при их оптимальных концентрациях (гиперпластификатор – 1,5 %, гидрофобизатор – 0,15 %, метакраолин – 5 % от массы цемента);
- исследовать влияние комплексного модификатора на процессы гидратации цементного камня;
- исследовать взаимовлияние компонентов комплексного модификатора между собой.

#### **Методы, материалы и оборудование, применяемые в исследовании**

В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ II/A-K (Ш-II) 32,5Б ГОСТ 31108-2003 производства ООО «Холсим (Рус)» (ОАО «Вольскцемент»). В состав цемента входят основные минералы:  $\text{C}_3\text{S}$  – 68 %,  $\text{C}_2\text{S}$  – 10 %,  $\text{C}_3\text{A}$  – 3,7 %,  $\text{C}_4\text{AF}$  – 15 % и добавки: опока – 6 %,  $\text{SO}_3$  – 2,2 %.

В качестве модификаторов в исследованиях использованы следующие добавки:

– гиперпластификатор (ГП) Remicrete SP 10 производства компании SCHOMBURG GmbH (Германия) (добавка соответствует PN-EN 934-2:Т3.1 и 3.2);

– гидрофобизатор (ГФ) кремнийорганический «Типром С» производства ООО «Производственное объединение «САЗИ» (ТУ 2229-069-32478306-2003), структурная формула  $R_nSi(OH)_{3-n}OK$ , где R – вид радикала.

В качестве активной минеральной добавки был выбран метакраолин (МтК) – аморфный силикат алюминия месторождения Журавлиный Лог (ТУ 5729-095-51460677-2009). Брутто-формула метакраолина  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  и структурная формула  $Al[Si_4O_{10}]OH_8$ , с содержанием 40 – 41 %  $Al_2O_3$ , 56 – 58 %  $SiO_2$ , 0,7 – 1,1 %  $Fe_2O_3$ , 0,4 – 0,6 %  $TiO_2$ , 0,55 – 0,85 %  $K_2O$ , 0,14 – 0,16 %  $Na_2O$ , 0,14 – 0,18 %  $CaO$ .

Регистрация ИК-спектров образцов производилась на Фурье ИК-спектрофотометре фирмы Perkin-Elmer, модель Spectrum 65, с помощью приставки НПВО Miracle ATR (кристалл ZnSe) в области  $4000-600\text{ см}^{-1}$ , как правило, при 20 сканах. Запись и вычитание фонового спектра производилась автоматически. Изучаемые образцы предварительно измельчались в вибромельнице в течение 5 минут до частиц микронного размера, после чего образовавшийся порошок прижимался к кристаллу НПВО специальным прижимом, входящим в комплект приставки. После регистрации автоматически осуществлялась НПВО-коррекция и сохранение спектра.

### Результаты исследования влияния комплексного модификатора на процессы гидратации цемента

С целью установления природы взаимодействий между компонентами комплексного модификатора (гиперпластификатором на основе эфиров поликарбоксилата, гидрофобизатором кремнийорганического и метакраолином), а также влияние комплексного модификатора на свойства цементного камня проведены высокоинформативные исследования методом инфракрасной спектроскопии (ИКС). Исследовались образцы цементного камня, содержащие гиперпластификатор – 1,5 %, гидрофобизатор – 0,15 %, метакраолин – 5 % от массы цемента. Результаты приведены на рис. 1.

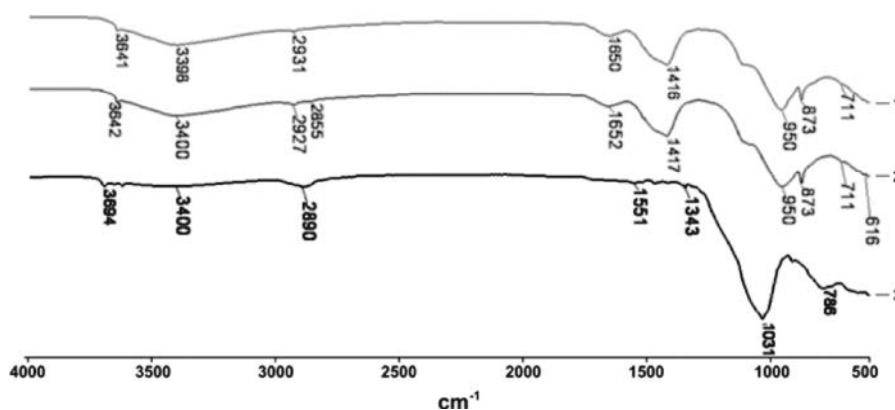


Рис. 1. Спектрограмма образцов: 1 – цементного камня; 2 – цементного камня с комплексным модификатором; 3 – комплексного модификатора

Группы полос в интервале между  $3643$  и  $3400\text{ см}^{-1}$  обусловлены валентными связями O–H в модифицированном цементном камне аналогичны с контрольным образцом. В частности полосы в области  $890-970\text{ см}^{-1}$  относятся к валентным колебаниям связи Si–O, Al–O, в остальной области до  $1200\text{ см}^{-1}$  присутствуют деформационные колебания связей Si–O, Al–O.

Анализ спектра частот для модифицированного цементного камня показал, что наблюдается широкая полоса с максимумом  $948\text{ см}^{-1}$ , которая обусловлена валентными и деформационными колебаниями связи Si–O, Al–O. Увеличение интенсивности полос поглощения в диапазоне  $1100...750\text{ см}^{-1}$  в составе с комплексной добавкой свидетельствует о большей степени гидратации цемента и увеличении продуктов гидратации. Полученные результаты ИК спектроскопии хорошо согласуются с данными работ [29].

Из данных на рис. 1 видно, что спектрограммы цементного камня с комплексным модификатором и без него характеризуются наличием нескольких специфических максимумов. Максимум поглощения при  $900-1000\text{ см}^{-1}$  характеризует гидросульфалоюминат кальция, содержание которого в образце с комплексным модификатором меньше по сравнению с контрольным образцом, что согласуется с данными РФА [28]. В присутствии комплексного модификатора наблюдается лучшая закристаллизованность ГСАК, по сравнению с контрольным образцом, на это указывает более четкая разрешимость спектра с максимумом  $948\text{ см}^{-1}$  (рис. 1). Наличие максимума полосы поглощения при  $1400-1600\text{ см}^{-1}$ , а также широкая полоса спектра в области  $3300-3500\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о наличии субмикроструктур гидросиликатов тоберморита, содержание которых в образце с комплексным модификатором выше, чем в контрольном. Хорошая разрешенность спектра в этих областях указывает на более высокую степень закристаллизованности отмеченных выше гидросиликатов кальция в присутствии комплексного модификатора. Узкая, хорошо разрешимая полоса спектра поглощения с максимумом  $3643\text{ см}^{-1}$  характеризует наличие гидроксидов гидросиликатов группы ксонолита.

Из представленных результатов видно, что наибольшее поглощение спектра наблюдается при частотах  $900-1000\text{ см}^{-1}$ ,  $1400-1600\text{ см}^{-1}$ ,  $3590-3650\text{ см}^{-1}$ . Однако наибольшая интенсивность линий спектра характерна для образца с комплексным модификатором.

На рис. 2 представлены спектрограммы образцов: гиперпластификатора, метаксаолина, смеси гиперпластификатора и метаксаолина. Образец № 3 содержит смесь гиперпластификатора и метаксаолина в отношении 3:10, что соответствует содержанию компонентов в комплексном модификаторе (гиперпластификатор – 1,5 %, метаксаолин – 5 % от массы цемента).

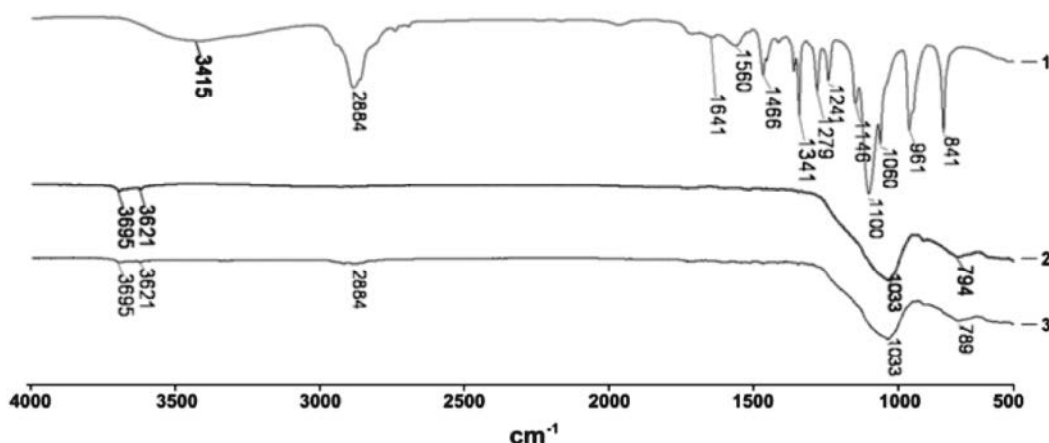


Рис. 2. Спектрограмма образцов:

1 – гиперпластификатора; 2 – метаксаолина; 3 – смеси гиперпластификатора и метаксаолина

Как видно из рис. 2, при введении гиперпластификатора Remicrete SP10 в спектре образца содержащего гиперпластификатор и метаксаолин появляется полоса  $2884\text{ см}^{-1}$  и интенсивность уменьшается (валентные колебания  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  групп). Это свидетельствует о том, что происходит химическое взаимодействие между метаксаолином и гиперпластификатором, причем это взаимодействие приводит к конверсии связей С-Н (алифатическая часть гиперпластификатора, содержащая  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  группы) добавки Remicrete SP10 в иные структуры, очевидно, химически связанные с метаксаолином.

Спектрограммы образцов представленных на рис. 3: ГП, МтК, смеси гидрофобизатора и метаксаолина. Образец № 3 содержит смесь гидрофобизатора и метаксаолина, в отношении 3:100, что соответствует содержанию компонентов в комплексном модификаторе (ГФ – 0,15 %, метаксаолин – 5 % от массы цемента).

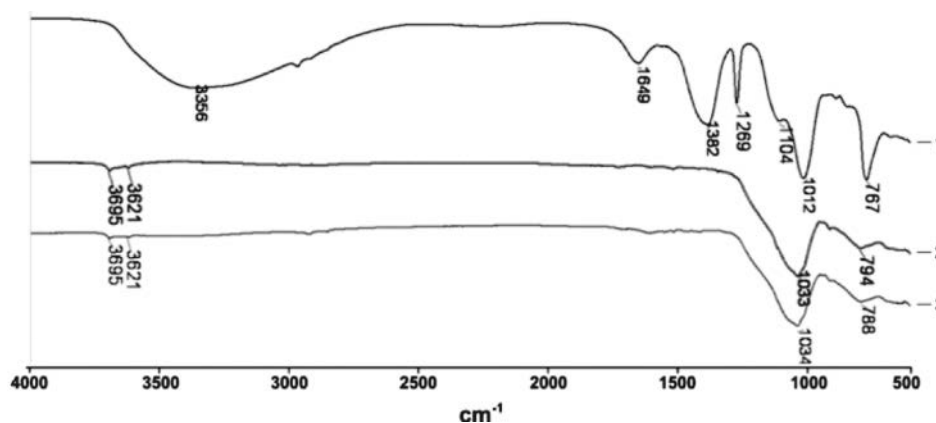


Рис. 3. Спектрограмма образцов: 1 – ГФ; 2 – МтК; 3 – смеси гидрофобизатора и метакаолина

Из данных спектрограмм, представленных на рис. 3 видно, что при введении ГФ в спектре образца содержащего ГФ и МтК полоса в спектре МтК  $794\text{ см}^{-1}$  смещается до  $788\text{ см}^{-1}$  в спектре образца и интенсивность уменьшается. Это свидетельствует о том, что происходит химическое взаимодействие между метакаолином и гидрофобизатором.

На рис. 4 представлены спектрограммы образцов: ГП, ГФ, смеси ГП и ГФ, метакаолина и комплексного модификатора. Для исследования спектрограмм компонентов комплексного модификатора процесс его приготовления состоял в следующем: сначала перемешивали гиперпластификатор и гидрофобизатор, затем полученную смесь добавляли к метакаолину, в итоге получили комплексный модификатор, содержащий ГП – 1,5 %, ГФ – 0,15 %, метакаолин – 5 % от массы цемента.

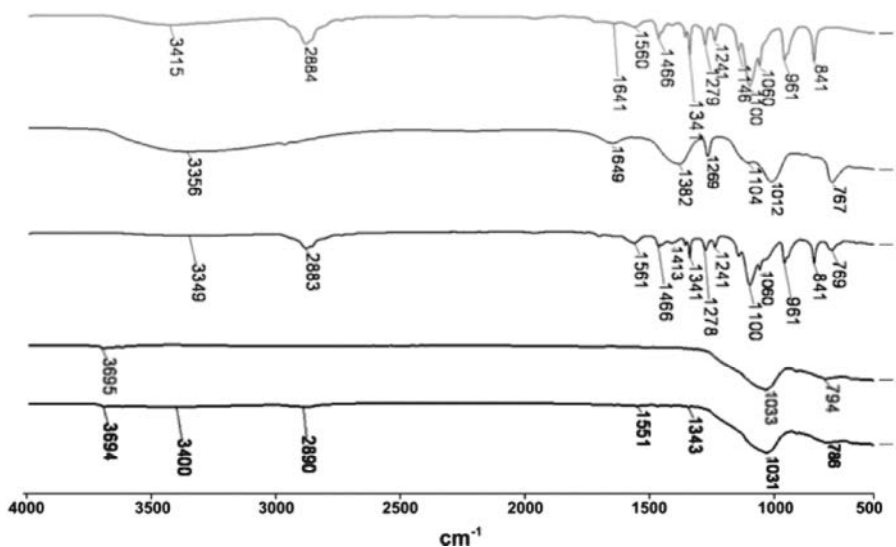


Рис. 4. Спектрограмма образцов: 1 – гиперпластификатора; 2 – гидрофобизатора; 3 – смеси гиперпластификатора и гидрофобизатора; 4 – метакаолина; 5 – комплексного модификатора

Как видно из рис. 4, при введении гиперпластификатора Remicrete SP10 в спектре комплексного модификатора полоса  $2884\text{ см}^{-1}$  смещается до  $2890\text{ см}^{-1}$  и интенсивность уменьшается (валентные колебания  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  групп),  $1467, 1342\text{ см}^{-1}$  (деформационные колебания этих же групп) исчезает  $1467\text{ см}^{-1}$ , а у полосы  $1342\text{ см}^{-1}$  уменьшается интенсивность. Это свидетельствует о том, что происходит химическое взаимодействие между метакаолином и гиперпластификатором с гидрофобизатором, причем это взаимодействие приводит к конверсии связей С-Н (алифатическая часть гиперпластификатора, содержащая  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  группы) добавки Remicrete SP10 в иные структуры, очевидно, химически связанные с метакаолином.

Образец, имеющий в своем составе гиперпластификатор и гидрофобизатор, показал отсутствие полосы поглощения  $1269 \text{ см}^{-1}$ , характерной для гидрофобизатора, что может свидетельствовать о хемосорбции связей СН-групп гиперпластификатором. В соответствии с Батраковым В.Г. [12] гидрофобизатор «Типром С» (55 %-ый концентрат на основе алкилсиликоната калия) имеет следующую структурную формулу:



где R – вид радикала (СН-группа).

Возможно, при перемешивании гидрофобизатора и гиперпластификатора происходит химическое взаимодействие СН-групп с молекулой гиперпластификатора, при этом гидрофобизирующая способность гидрофобизатора не уменьшается, так как за данную способность отвечает вид связи Si-OK.

Предварительное перемешивание гиперпластификатора и водорастворимого гидрофобизатора в составе комплексного модификатора не только не уменьшает эффективность модификаторов, но и связывает их в единый компонент.

Таким образом, влияние комплексного модификатора в механизме пластифицирования и гидратации цементных систем может состоять в следующем: пластифицирующая способность гиперпластификатора на основе эфира поликарбоксилата повышается благодаря формированию между частицами портландцемента расклинивающего твердофазного топологического барьера из частиц метакеолина [26], на котором адсорбирована часть гиперпластификатора и гидрофобизатора, что снижает агрегацию частиц цемента и повышает диспергирующую способность комплексного модификатора. За счет синергетического взаимодействия компонентов комплексного модификатора более интенсивно происходит процесс структурообразования цементного камня и существенное повышение ранней прочности. В процессе структурообразования цементного камня происходит дополнительная гидрофобизация стенок и пор капилляров, что существенно повышает стойкость модифицированного бетона к воздействию агрессивных сред.

### Заключение

1. Методом ИК-спектроскопии установлено, что при модификации цементных систем комплексным модификатором происходит увеличение продуктов гидратации. В составе с комплексным модификатором наблюдается полоса поглощения при  $948 \text{ см}^{-1}$  указывающая на лучшую закристаллизованность ГСАК. Установлено, что в присутствии комплексного модификатора отмечается более высокая степень закристаллизованности гидросиликатов кальция, что обуславливает высокие физико-механические характеристики модифицированного самоуплотняющегося бетона.

2. Предварительное перемешивание гиперпластификатора и водорастворимого гидрофобизатора в составе комплексного модификатора при предварительном его приготовлении не только не уменьшает эффективность модификаторов, но и связывает их в единый компонент. Установлено, что происходит хемосорбция связей СН-групп гиперпластификатором. При этом введение метакеолина в состав комплексного модификатора приводит к химическому взаимодействию его компонентов с конверсией связей С-Н в иные структуры, очевидно, химически связанные с метакеолином.

### Список библиографических ссылок

1. Ibragimov R. A. The influence of binder modification by means of the superplasticizer and mechanical activation on the mechanical properties of the high-density concrete // ZKG International. 2016. № 6. P. 34–39.
2. Kirsanova A. A., Kramar L. Y. Additives based on metakaolin features in concrete. Conference Series // Materials Science and Engineering. 2015. № 71.
3. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Кардумян Г. С. Новые модифицированные бетоны. М. : Типография «Парадиз». 2010. 258 с.
4. Каприелов С. С., Травуш В. И., Карпенко Н. И., Шейнфельд А. В., Кардумян Г. С., Киселева Ю. А., Пригоженко О. В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 13–18.

5. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // *Advanced Concrete Technology*. 2003. № 1. P. 5–15.
6. Izotov V. S., Ibragimov R. A. The influence of complex additives on the endurance strength of concrete // *ZKG: Zement – Kalk – Gips International*. 2013. Vol. 66. № 9. P. 54–59.
7. Liu Z., Wang D., Zhang L., Shi L. Influence of molecular structure optimization of polycarboxylate superplasticizer on slurry dispersion and early mortar strength. Tenth International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Prague. 2012. Suppl. Vol. 1. P. 368–376.
8. Вовк А. И. Добавки на основе отечественных поликарбоксилатов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2012. № 9 (164). С. 31–33.
9. Никишкин В. А. Условия работы цементного камня, обработанного кремнийорганическими гидрофобизаторами // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2011. № 10 (153). С. 22–24.
10. Войтович В. А., Хряпченкова И. Н., Яворский А. А. Гидрофобизация как способ повышения срока службы зданий (информация) // *Строительные материалы*. 2013. № 12. С. 15–17.
11. Войтович В. А., Хряпченкова И. Н. Направления применения гидрофобизаторов в строительстве (информация) // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 76.
12. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. : Технопроект, 1998. 768 с.
13. Stark J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 666–678.
14. Li Q., Shui Z., Geng H., Huang Y. Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: a comparative study // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 101. P. 184–192.
15. Rashad A. M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition-a comprehensive overview // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 41. P. 303–318.
16. Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R. Durability of mortars modified with metakaolin. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. № 9. P. 1473-1479.
17. Кирсанова А. А., Крамар Л. Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакалина для цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2013. № 11. С. 54–56.
18. Шейнфельд А. В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2014. № 3. С. 16–21.
19. Изотов В. С., Ибрагимов Р. А., Богданов Р. Р. Исследование влияния супер- и гиперпластификаторов на основные свойства цементного теста // *Известия КГАСУ*. 2013. № 2 (24). С. 221–225.
20. Изотов В. С., Ибрагимов Р. А., Богданов Р. Р. Исследование влияния отечественных гидрофобизаторов на основные свойства цементного теста и раствора // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 207–210.
21. Гамалий Е. А., Трофимов Б. Я., Крамар Л. Я. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2009. № 16 (149). С. 29–35.
22. Kim Hong – Sam, Lee, Sang-Ho, Moon Han – Young Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin // *Construction and Building Materials Journal*. 2007. № 1. P. 128.
23. Тейлор, Х. Ф. Химия цемента. М. : Мир, 1996. 560 с.
24. Самоуплотняющаяся бетонная смесь: пат. 2632795 Рос. Федерация. № 2016117505; заявл. 04.05.2016; опубл. 09.10.2017, Бюл. № 28. 9 с.
25. Морозов Н. М., Авксентьев В. И., Боровских И. В., Хозин В. Г. Применение отсеков дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 7 (42). С. 26–31.

26. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : АСВ, 2006. 368 с.
27. Королев Е. В. Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 9–14.
28. Богданов Р. Р., Ибрагимов Р. А. Процессы гидратации и структурообразования модифицированного самоуплотняющегося бетона // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5 (73). С. 14–24.
29. Etienne B., Saitta A. M., Mauri F., Calas G. First-principles modeling of the infrared spectrum of kaolinite // American Mineralogist. 2001. V. 86. P. 1321–1330.

**Bogdanov R.R.** – assistant

E-mail: [bogdanov.r.r@yandex.ru](mailto:bogdanov.r.r@yandex.ru)

**Ibragimov R.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [rusmag007@yandex.ru](mailto:rusmag007@yandex.ru)

**Potapova L.I.** – candidate of chemical sciences, associate professor

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Investigation of the interaction of a complex modifier for self-compacting concrete and its components using the IR-spectroscopy method**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the study was to establish the nature of interactions between the components of a complex modifier (a hyperplasticizer based on polycarboxylate esters, a hydrophobizer based on potassium silicates and metakaolin), and the effect of a complex modifier on the properties of cement stone using the IR spectroscopy method.

*Results.* The main results of the study are that a higher degree of crystallization of calcium hydrosilicates is observed in the presence of a complex modifier, which causes high physical and mechanical characteristics of the modified self-compacting concrete. It was revealed that the preliminary mixing of the superplasticizer and the water-soluble hydrophobizer in the complex modifier in its preliminary preparation not only does not reduce the effectiveness of the modifiers, but also binds them into a single component. It has been established that chemisorption of CH bonds is a superplasticizer. In this case, the introduction of metakaolin in the complex modifier leads to a chemical interaction of its components with the conversion of C-H bonds to other structures, apparently chemically related to metakaolin.

*Conclusions.* The scientific and practical significance of the results of the work for building materials science and the construction industry is to establish the effectiveness of the preliminary mixing of the superplasticizer and hydrophobizer in the preparation of complex additives.

**Keywords:** self-compacting concrete, infra-red spectroscopy, superplasticizer admix, hydrophobizer, metakaolin, complex modifier agent.

#### **References**

1. Ibragimov R. A. The influence of binder modification by means of the superplasticizer and mechanical activation on the mechanical properties of the high-density concrete // ZKG International. 2016. № 6. P. 34–39.
2. Kirsanova A. A., Kramar L. Y. Additives based on metakaolin features in concrete. Conference Series // Materials Science and Engineering. 2015. № 71.
3. Kapriellov S. S., SHEjnfel'd A. V., Kardumyan G. S. Novye modifitsirovannye betony. M. : Tipografiya «Paradiz», 2010. 258 p.
4. Kapriellov S. S., Travush V. I., Karpenko N. I., SHEjnfel'd A. V., Kardumyan G. S., Kiseleva Yu. A., Prigozhenko O. V. The modified new generation of concrete structures in MIBC «Moscow City» // Stroitel'nye materialy. 2006. № 10. P. 13–18.
5. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Advanced Concrete Technology. 2003. № 1. P. 5–15.

6. Izotov V. S., Ibragimov R. A. The influence of complex additives on the endurance strength of concrete // ZKG: Zement – Kalk – Gips International. 2013. Vol. 66. № 9. P. 54–59.
7. Liu Z., Wang D., Zhang L., Shi L. Influence of molecular structure optimization of polycarboxylate superplasticizer on slurry dispersion and early mortar strength. Tenth International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Prague. 2012. Suppl. Vol. 1. P. 368–376.
8. Vovk A. I. Additives on the basis of domestic polycarboxylates // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. 2012. № 9 (164). P. 31–33.
9. Nikishkin V. A. Working conditions cement paste treated with organosilicon water repellents // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. 2011. № 10 (153). P. 22–24.
10. Vojtovich V. A., Hrpapchenkova I. N., Javorskij A. A. Waterproofing as a way to extend the life of buildings (information) // Stroitel'nye materialy. 2013. № 12. P. 15–17.
11. Vojtovich V. A., Hrpapchenkova I. N. Areas of application water-proofing in construction (info) // Stroitel'nye materialy. 2015. № 7. P. 76.
12. Batrakov V. G. Modified concrete // Teorija i praktika. 1998. 768 p.
13. Stark J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. Cement and Concrete Research. 2011. № 41. P. 666–678.
14. Li Q., Shui Z., Geng H., Huang Y. Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: a comparative study // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 184–192.
15. Rashad A. M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition-a comprehensive overview. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 41. P. 303–318.
16. Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R. Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. № 9. P. 1473–1479.
17. Kirsanova A. A., Kramar L. Ya. Organic-based modifiers metakaolin for cement concrete // Stroitel'nye materialy. 2013. № 11. P. 54–56.
18. Sheinfel'd A. V. Organic-modifiers as a factor that increases the durability of reinforced concrete structures // Beton i zhelezobeton. 2014. № 3. P. 16–21.
19. Izotov V. S., Ibragimov R. A., Bogdanov R. R. Studies of the influence of super- and giper plasticizers on the basic properties of cement paste // Izvestiya KGASU. 2013. № 2 (24). P. 221–225.
20. Izotov V. S., Ibragimov R. A., Bogdanov R. R. Studies of the influence of domestic water-repelling additions on the basic properties of cement paste and mortar // Izvestiya KGASU. 2013. № 4 (26). P. 207–210.
21. Gamalij E. A., Trofimov B. Ja., Kramar L. Ja. Structure and properties of cement stone with additives of microsilica and polycarboxylate plasticizer // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2009. № 16 (149). P. 29–35.
22. Kim Hong – Sam, Lee, Sang-Ho, Moon Han – Young Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin // Construction and Building Materials Journal. 2007. № 1. P. 128.
23. Teylor Kh. F. Chemistry of cement. M. : Mir, 1996. 560 p.
24. Self-sealing concrete mix: patent 2632795 Rus. Federation. № 2016117505; decl. 04.05.2016; publ. 10.09.2017, Bull. № 28. 9 p.
25. Morozov N. M., Avksentev V. I., Borovskikh I. V., Khozin V. G. Application of screening crushing of crushed stone in self-compacting concretes // Engineering and construction magazine. 2013. № 7 (42). P. 26–31.
26. Bazhenov Yu. M., Dem'yanova V. S., Kalashnikov V. I. Modified high-quality concretes. M. : ASV, 2006. 368 p.
27. Korolev E. V. Technical and economic efficiency and perspective building materials // Regional architecture and construction. 2013. № 3. P. 9–14.
28. Bogdanov R. R., Ibragimov R. A. Process of hydration and structure formation of the modified self-compacting concrete // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 5. P. 14–24.
29. Etienne B., Saitta A. M., Mauri F., Calas G. First-principles modeling of the infrared spectrum of kaolinite // American Mineralogist. 2001. V. 86. P. 1321–1330.



УДК 691.545

**Ермилова Е.Ю.** – ведущий специалист по проектированию ВК

E-mail: [lizabeta\\_91@list.ru](mailto:lizabeta_91@list.ru)

**ООО «Инженерный Центр Высотные Специальные Технологии»**

Адрес организации: 420088, Россия, г. Казань, ул. Журналистов, д. 54

**Камалова З.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [zlesik@mail.ru](mailto:zlesik@mail.ru)

**Рахимов Р.З.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [rahimov@kgasu.ru](mailto:rahimov@kgasu.ru)

**Щелконогова Я.В.** – студент

E-mail: [yankeeslucky@gmail.com](mailto:yankeeslucky@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Состав продуктов гидратации композиционного цементного камня с комплексной добавкой термоактивированной полиминеральной глины и известняка**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель работы – определение состава продуктов гидратации в возрасте 28 суток композиционного цементного камня с комплексной добавкой на основе термоактивированной полиминеральной глины и карбонатной породы с содержанием кальцита 99 %.

*Результаты.* С использованием рентгенофазового анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии определен состав продуктов гидратации композиционного цементного камня в возрасте 28 суток твердения с комплексной добавкой термоактивированной глины и известняка. С помощью результатов РФА и ДСК показано, что использование 20 % комплексной добавки термоактивированной полиминеральной глины и известняка в композиционном портландцементе позволяет существенно снизить содержание образовавшегося портландита, увеличить количество новообразований в виде низкоосновных гидросиликатов и гидрокарбосиликатов кальция, находящихся в аморфной фазе, что приводит к увеличению прочностных характеристик. Образование гидрокарбоалюминатов кальция приводит к стабилизации процесса образования этtringита.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в расширении номенклатуры композиционных портландцементов за счет применения доступного минерального сырья для получения комплексных добавок.

**Ключевые слова:** композиционный цемент, цементный камень, комплексная добавка, известняк, термоактивированная глина, РФА, ДСК.

#### **Введение**

Композиционные портландцементы с минеральными добавками один из наиболее эффективных и простых путей осуществления концепции устойчивого («sustainable») развития цементной промышленности и строительной индустрии в целом. Однако, на сегодняшний день в России среднее содержание минеральных добавок в портландцементе составляет только 13 % [1], в то время как, общемировой показатель составляет 20 % [2]. Вместе с тем, по прогнозам специалистов доля добавок, вводимых в портландцемент, может вырасти до 28-34 % к 2050 г., а к 2100 до 34-40 % [2]. Однако, ресурсы существующих минеральных добавок не удовлетворяют растущим в них потребностям. Поэтому учеными в качестве альтернативы существующим на сегодняшний день минеральным добавкам рассматриваются прокаленные глины. Наибольшей эффективностью среди последних обладает продукт прокаливания каолиновых глин – метакралин, использование которого в цементной промышленности ограничивается малыми запасами и высокой потребностью этого материала в других отраслях промышленности (керамика, целлюлозно-бумажная и др.). В связи с этим, в последнее время рассматривается возможность получения эффективных минеральных

добавок на основе термоактивированных полиминеральных глин с низким содержанием каолинита и его полном отсутствии [3-5]. С другой стороны, совместное введение термоактивированных полиминеральных глин и известняков приводит к повышению физико-технических показателей получаемых цементов и бетонов [6-10]. В предыдущей работе [8] было исследован состав продуктов гидратации композиционного цементного камня с комплексной добавкой на основе полиминеральной каолиновой глины и карбонатной породы с содержанием кальцита 99 %.

**Целью работы** явилось определение состава продуктов гидратации в возрасте 28 суток композиционного цементного камня с комплексной добавкой на основе термоактивированной полиминеральной глины и карбонатной породы с содержанием кальцита 99 %.

#### Экспериментальная часть

В качестве вяжущего использовался портландцемент ОАО «Вольскцемент» марки ЦЕМ I 42,5 Н (табл. 1-2).

Таблица 1

Характеристики портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н

Прочность на сжатие МПа		Свойства	
3 суток	33,5	Нормальная густота	27,5 %
28 суток	51,0	Насыпная плотность	1000 г/л
После пропарки	42,0	Уд. поверхность (по Блейну)	345 м <sup>2</sup> /кг
		Начало схватывания	2:50 ч:мин
		Конец схватывания	4:10 ч:мин
Минералогический состав			
Белит C <sub>2</sub> S	Алит C <sub>3</sub> S	Алюмоферриты C <sub>4</sub> AF	Алюминаты C <sub>3</sub> A
11,0	67,0	15,0	4,0

Таблица 2

Химический состав материалов

Химический состав (%)	ЦЕМ I 42,5Н	Полиминеральная глина	Известняк
CaO	63,0	2,16	54,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	13,96	0,1
SiO <sub>2</sub>	20,5	64,5	1,1
MgO	1,5	2,18	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	7,30	0,07
SO <sub>3</sub>	3,0	< 0,05	-
K <sub>2</sub> O	-	1,97	-
Na <sub>2</sub> O	-	0,98	-
Na <sub>2</sub> O <sub>экв</sub>	0,7	-	-
FeO	-	0,88	-
TiO <sub>2</sub>	-	1,97	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,11	-
MnO	-	0,10	-

В качестве алюмосиликатного компонента комплексной добавки была взята глина Кошаковского месторождения РТ с содержанием каолинита 4,1 %, кварца – 35,8 %, слюды – 6,0 %, ортоклаза – 14,8 %, плагиоклаза – 17,4 %, хлорита – 4,1 %, монтмориллонита – 17,9 % (табл. 2). Процесс термоактивации глинистого сырья проводился в лабораторной электропечи SNOL-7,2/1100 при температуре 780 °С в течение 2,9 часа. В качестве карбонатной породы был принят известняк Владимирской области Добрятинского месторождения с содержанием кальцита 99 % (табл. 2). Удельная поверхность была подобрана экспериментально и составила 500 м<sup>2</sup>/кг.

Образцы-кубики размерами  $2 \times 2 \times 2$  см готовили из теста нормальной плотности, которые до испытания хранились 28 суток в воде. Идентификация изменений минералогического состава и продуктов новообразований, возникающих в процессе твердения проводилась рентгенофазовым анализом с применением автоматического рентгенодифрактометра D2 Phaser (фирмы Bruker). Использовалось  $\text{CuK}\alpha$  излучение, монохроматизированное ( $\lambda(\text{Cu-K}\alpha) = 1,54184 \text{ \AA}$ ) германиевым изогнутым монохроматором Йохансона. Режим работы рентгеновской трубки – 40 kV, 40 mA. Эксперименты выполнялись при комнатной температуре в геометрии Брэгг-Брентано с плоским образцом. Для анализа и построения дифрактограмм использовалось программное обеспечение Bruker Diffrac Eva.

Термический анализ образцов проводился с помощью метода совмещенной термогравиметрии (ТГ) и сканирующей дифференциальной калориметрии (ДСК) в термоанализаторе Netzsch STA 449 F3 Jupiter при непрерывном нагреве (от 40 до  $1000^\circ\text{C}$ ) образцов массой около 35-40 мг со скоростью  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$  в потоке воздуха ( $50 \text{ мл}/\text{мин}$ ) в тиглях из алунда.

### Результаты и обсуждение

Содержание комплексной добавки составило 20 % от массы портландцемента. Количество известняка в комплексной добавке было принято от общей массы добавки и оставило 15 %.

### Рентгенофазовый анализ образцов цементного камня

Дифрактограмма цементного камня контрольного образца представлена рис. 1. Из полученных данных видно, что минералогический состав характеризуется значительными пиками портландита ( $d=(4,918; 3,110; 2,630; 1,928) \cdot \text{\AA}$ ), непрогидратировавших минералов клинкера – алита ( $d=(2,748; 2,609; 2,316; 2,188) \cdot \text{\AA}$ ) и белита ( $d=(4,655; 2,787; 2,777; 2,293; 2,195; 2,050; 2,028; 1,980) \cdot \text{\AA}$ ). Наблюдается присутствие гидроалюмосиликатов кальция ( $d=(7,312; 4,260; 3,178; 2,672) \cdot \text{\AA}$ ) и небольшого содержания кальцита ( $d=(3,037; 2,494; 1,913; 1,877) \cdot \text{\AA}$ ), образовавшегося в результате хранения образцов. Образовавшийся этtringит характеризуется пиками с межплоскостными расстояниями  $d=(9,826; 5,934) \cdot \text{\AA}$ . Образовавшиеся гидромосульфалюминаты кальция характеризуются дифракционными максимумами с межплоскостными расстояниями  $d=(9,002; 3,432; 2,973) \cdot \text{\AA}$ .

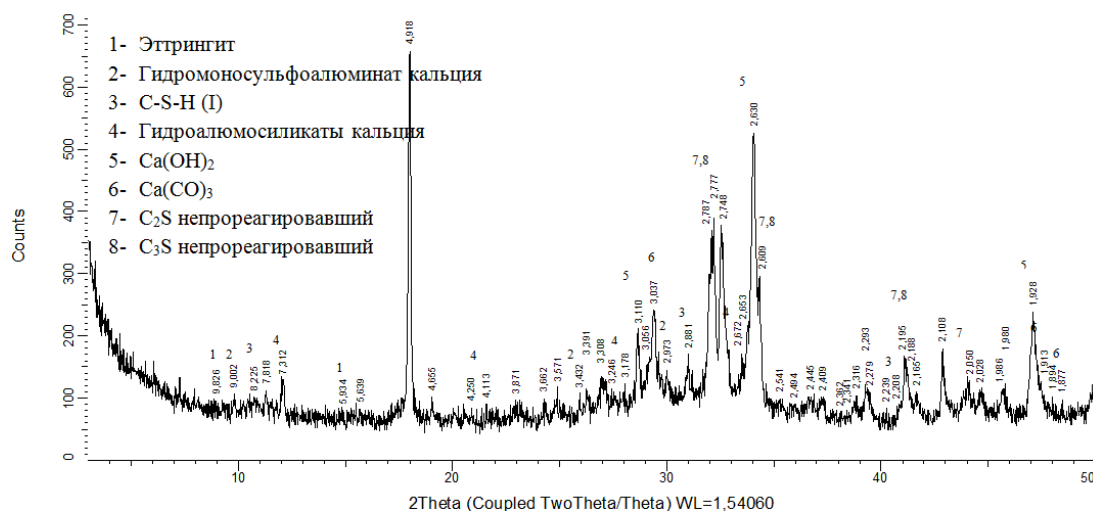


Рис. 1. Дифрактограмма образца цементного камня контрольного состава

Образованию гидросиликатов кальция типа C-S-H (I) соответствуют дифракционные максимумы с межплоскостными расстояниями  $d=(8,225; 3,871; 2,881; 2,208) \cdot \text{\AA}$ . Количество аморфной фазы равно 34,7 % от массы образца.

На рис. 2 представлена дифрактограмма образца композиционного цементного камня с 20 % комплексной минеральной добавки на основе термоактивированной глины и известняка с содержанием кальцита 99 %. Большое количество дифракционных максимумов с высокой интенсивностью относится к карбонату кальция ( $d=(3,041; 2,494; 2,284; 2,094; 1,877)\cdot\text{Å}$ ). Гидроалюмосиликаты кальция характеризуются пиком с межплоскостным расстоянием  $d=(7,321)\cdot\text{Å}$ .

На поверхности частиц  $\text{CaCO}_3$  наблюдается полное превращение гидромосульфалюминатов кальция ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot(11-12)\text{H}_2\text{O}$ ), образованных при гидратации портландцемента, в гидромоникарбоалюминаты кальция ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot(11-12)\text{H}_2\text{O}$ ) ( $d=(4,262; 3,221; 2,978)\cdot\text{Å}$ ) [11].

Этtringит ( $d=(5,778; 2,452)\cdot\text{Å}$ ) и портландит ( $d=(4,912; 2,651; 1,923)\cdot\text{Å}$ ) присутствуют в очень незначительном количестве.

Аморфная фаза увеличивается по сравнению с контрольным составом до 50 %, и небольшая часть возникших новообразований закристаллизована в виде низкоосновных гидросиликатов типа C-S-H и гидроалюмосиликатов типа C-A-S-H ( $d=(9,935; 2,969; 2,783)\cdot\text{Å}$ ) [12].

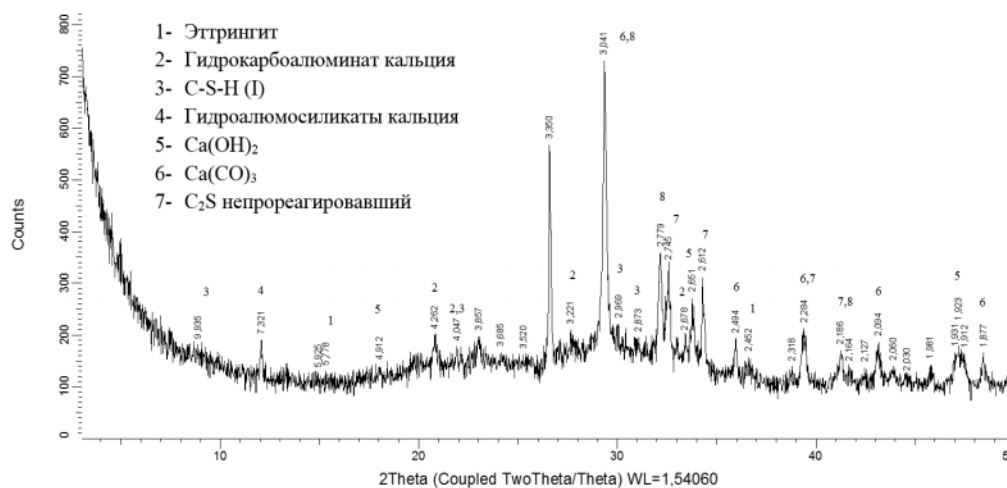


Рис. 2. Дифрактограмма образца композиционного цементного камня с 20 % комплексной добавкой

### Дифференциально-сканирующая калориметрия образцов цементного камня

На рис. 3 приведена дериватограмма образца цементного камня контрольного состава. Эндотермический эффект при 70 °C наблюдается быть связан с потерей свободной воды из пор и пустот цементного камня [12]. На кривой ДТГ рядом наблюдается эндоэффект при 100-125 °C, связанный с потерей адсорбционной воды [12]. Дегидратации этtringита соответствует эндотермический пик при температурах 125-150 °C [12]. Разложение гидроксида кальция характеризуется эндотермическим эффектом с температурным максимумом при 460,65 °C и потерей массы в количестве 1,86 %.

Разложение карбоната кальция, образовавшегося при твердении образца цементного камня, происходит в эндотермическом эффекте с температурным максимумом при 680,0 °C. Потеря массы составляет 4,82 %.

На рис. 4 представлена дериватограмма образца композиционного цементного камня с 20 % комплексной добавки. Эндотермический эффект с температурным максимумом при 108,1 °C включает в себя несколько рядом расположенных эндоэффектов, которые связаны с потерей свободной и адсорбционной воды низкоосновными гидросиликатами типа C-S-H (I) [12] и алюминийзамещенными гидросиликатами. Дегидратации этtringита соответствует эндоэффект при 150-175 °C.

Эндотермический эффект с температурным максимумом при 449,0 °C характеризует разложение портландита [12]. Снижение величины теплового эффекта составляет 13 Дж/г по сравнению с образцом контрольного состава, что подтверждает происходящую пуццолановую реакцию.

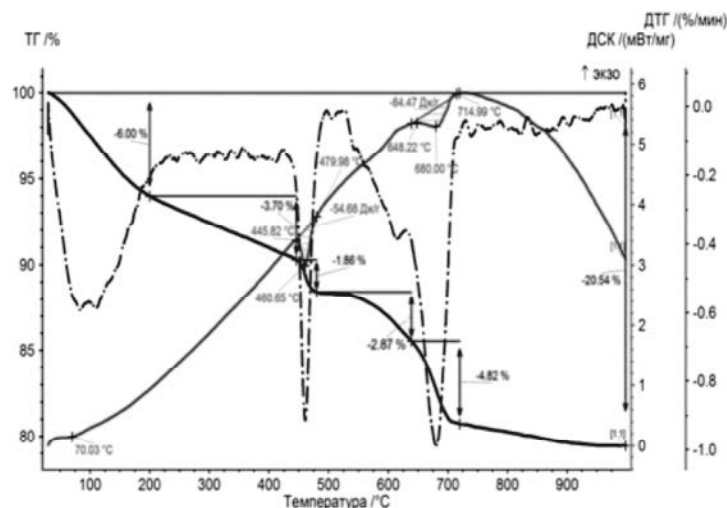


Рис. 3. Дериватограмма образца цементного камня контрольного состава

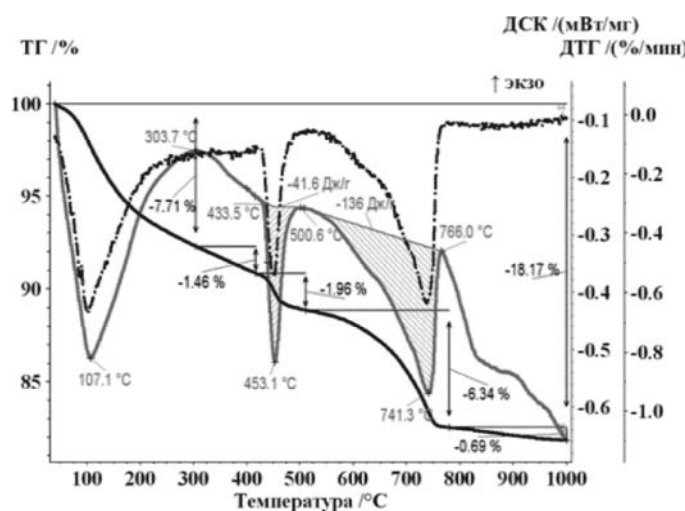


Рис. 4. Дериватограмма образца композиционного цементного камня с 20 % комплексной добавкой

Разложение содержащегося избытка реликтового карбоната кальция известняка соответствует эндотермическому эффекту с температурным максимумом при 740,6 °С. Разложение образовавшегося в процессе твердения карбоната кальция происходит при температурах 680-700 °С. Потеря массы составляет 6,78 %.

### Заключение

В результате исследования состава новообразований при твердении композиционного цементного камня методами рентгенофазового анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии показано, что использование термоактивированной полиминеральной глины (каолинит – 4 %) и карбонатной породы (кальцит – 99 %) в составе комплексной добавки приводит к полному переходу гидросульфоалюминатов кальция в гидрокарбоалюминаты кальция, что способствует стабилизации процесса образования этtringита. Кроме того, образование гидрокарбоалюминатов способствует упрочнению структуры твердеющего цементного камня, созданию кристаллического каркаса на ранних сроках твердения. В результате протекающей пуццолановой реакции, наблюдается повышенное образование низкоосновных гидросиликатов кальция типа C–S–H (I) и увеличение количества аморфной фазы, что способствует заполнению межкристаллического пространства композиционного цементного камня.

**Список библиографических ссылок**

1. Ludwig H.-M. CO<sub>2</sub>-arme Zemente für nachhaltige Betone // Ibausil 16-19 September 2015. Weimar, Deutschland. 2015. Band 2. P. 7–32.
2. Скобло Л. И. Цементная промышленность на постсоветском пространстве – сегодня: взгляд изнутри // Цемент и его применение. 2016. № 1. С. 28–29.
3. Ермилова Е. Ю., Камалова З. А., Рахимов Р. З., Стоянов О. В., Хантимиров А. Г., Габбасов Д. А., Ахтариев Р. Р. Исследование влияния скорости подъема температуры при термоактивации глин на их пуццолановую активность // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 4. С. 25–27.
4. Proceedings: Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement, Beijing, China, 2015. Vol. I. 704 p.
5. Ермилова Е. Ю., Камалова З. А., Рахимов Р. З., Стоянов О. В., Савинков С. А. Термически-активированная глина как альтернативная замена метакеолина в композиционных портландцементных // Вестник Казанского технологического университета. 2015. т. 18. № 4. С. 175–179.
6. Скибстед Й., Даи З., Расмуссен К. Е., Гарг Н. Термическая активация и пуццолановая активность кальцинированных глин для использования в портландцементных с добавками // Цемент и его применение. 2016. № 1. С. 144–151.
7. Ермилова Е. Ю., Камалова З. А., Рахимов Р.З., Гуляева Р.И. Исследование влияния комплексных добавок на основе карбонатных пород и термоактивированной полиминеральной глины на состав продуктов гидратации композиционного цементного камня // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 198–205.
8. Стеенберг М., Херфорт Д., Поульсен С. Л., Скибстед Й., Дамтофт Й. С. Композиционный цемент на основе портландцемента, известняка и прокаленной глины // Цемент и его применение. 2014. № 5. С. 44–49.
9. Буланов П. Е., Гимазов А. Р., Замалиев И. Р., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Влияние содержания портландцемента на свойства укрепленных глинистых грунтов различного минералогического состава // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 9. С. 24–27.
10. Antoni M., Rossen J., Martirena F., Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. P. 1579–1589.
11. Dhir K., Limbachiya M. S., McCarthy M. J., Chaipanich A. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction // Materials and Structures. 2007. Vol. 40. Iss. 5. P. 459–473.
12. Макарова И. А., Лохова Н. А. Физико-химические методы исследования строительных материалов. Братск : БГУ, 2011. 139 с.

**Ermilova E.Yu.** – leading specialist in designing WS

E-mail: [lizabeta\\_91@list.ru](mailto:lizabeta_91@list.ru)

**ООО «Engineering Center of High-Rise Special Technology»**

The organization address: 420088, Russia, Kazan, Journalists st., 54

**Kamalova Z.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [zlesik@mail.ru](mailto:zlesik@mail.ru)

**Rakhimov R.Z.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [rahimov@kgasu.ru](mailto:rahimov@kgasu.ru)

**Shchelkonogova Ya.V.** – student

E-mail: [yankeeslucky@gmail.com](mailto:yankeeslucky@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Hydration products composition of blended cement stone  
with a complex additive calcined polymineral clay and limestone**

**Abstract**

*Problem statement.* The aim of this – the determination of the composition of hydration products at 28 days blended cement stone with a complex additive based on calcined polymineral clay and carbonate rock with calcite content of 99 %.

*Results.* Using X-ray diffraction and Differential scanning calorimetry the composition of hydration products of blended cement stone at the age of 28 days of curing with the complex additive of calcined clay and limestone was determined. Using the results of XRD and DSC it is shown that the use of 20 % of a complex additive calcined polymineral clay and limestone in blended Portland cement can significantly reduce the formed portlandite content, to increase the number of new formation in the form of low-basic calcium hydrosilicates and calcium hydrocarbosilicates as the amorphous phase, which leads to increased strength characteristics. The calcium hydrocarboaluminates formation leads to stabilization process of ettringite formation.

*Conclusions.* Significance of the obtained results for the construction industry is in expanding the range of blended Portland cement by the use of available mineral raw materials for the production of complex additives.

**Keywords:** blended cement, cement stone, complex additive, limestone, calcined clays, XRD, DSC.

### References

1. Ludwig H.-M. CO<sub>2</sub>-arme Zemente für nachhaltige Betone // Ibausil. Weimar. Deutschland. 2015. Band 2. P. 7–32.
2. Scoble L. I. Cement industry in the former Soviet Union today: an inside look // Tsement i ego primeneniye. 2016. № 1. P. 28–29.
3. Ermilova E. Yu., Kamalova Z. A., Rakhimov R. Z., Stoyanov, O. V., Khantemirov A. G., Gabbasov, D. A., Akhtareev R. R. Study of the influence of rate of the temperature rise at the clay calcination on its pozzolanic activity // Repair. Recovery. Modernization. 2017. № 4. P. 25–27.
4. Proceedings: Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement, Beijing, China, 2015. Vol. I. 704 p.
5. Ermilova E. Yu., Kamalova Z. A., Rakhimov R. Z., Stoyanov O. V. Savinkov S. A. Thermally-activated clay as an alternative replacement of metakaolin in composite Portland cement // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. Vol. 18. № 4. P. 175–179.
6. Skibsted Y., Dai, Z., Rasmussen K. E., Garg N. Thermal activation and pozzolanic activity of calcinated clay for use in Portland cement with additives // Tsement i ego primeneniye. 2016. № 1. P. 144–151.
7. Ermilova E. Yu., Kamalova Z. A., Rakhimov R. Z., Gulyaeva R. I. Research of influence of complex additives based on carbonate rocks and calcined polymineral clay on the composition of hydration products of blended cement stone // Izvestiya KSUAE. 2017. № 1 (39). P. 198–205.
8. Steenbergen M., Herford D., Poulsen S. L., Skibsted Y., Damtoft Y. C. Blended cement based on Portland cement, limestone and calcined clay // Tsement i ego primeneniye. 2014. № 5. P. 44–49.
9. Bulanov P. E., Gimazov A. R. Zamaliev R. I., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Influence of the content of Portland cement on the properties of strength clay soils of different mineralogical composition // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2017. № 9. P. 24–27.
10. Antoni M., Rossen J., Martirena F., Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. P. 1579–1589.
11. Dhir K., Limbachiya M. C., McCarthy M. J., Chaipanich A. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction // Materials and Structures. 2007. Vol. 40. Iss. 5. P. 459–473.
12. Makarova I. A., Lokhova N. Physico-chemical methods for research of construction materials: training manual. Bratsk : BSU, 2011. 139 p.

УДК 691.327:666.97

**Кашапов Р.Р.** – заведующий лабораторией

E-mail: [ramires120490@mail.ru](mailto:ramires120490@mail.ru)

**Красникова Н.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [knm0104@mail.ru](mailto:knm0104@mail.ru)

**Хозин В.Г.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [khozin@kgasu.ru](mailto:khozin@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## **Исследование эксплуатационных характеристик тяжелых цементных бетонов с полифункциональной добавкой**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – оценить физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики цементных бетонов с полифункциональной добавкой и сравнить с существующими аналогами.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что разработанная добавка пластифицирующего-ускоряющего-упрочняющего действия не уступает известным аналогам по влиянию на морозостойкость и водонепроницаемость бетона, а превосходит их по водопоглощению, модулю упругости, призмочной прочности и усадочной деформации.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что бетоны с разработанной добавкой повышают долговечность, а именно коррозионную стойкость (по Москвину II и III вид коррозии, соответственно, щелочестойкость, сульфатостойкость).

**Ключевые слова:** полифункциональная добавка, модуль упругости, призмочная прочность, усадочная деформация, долговечность.

Разработка комплексных добавок полифункционального действия (ПФД), не имеющих побочного негативного влияния на технологические или эксплуатационно-технические свойства бетонной смеси и отвердевшего бетона – важнейшая задача модифицирования, далекая до завершения, критерием оптимальности которого является отношение стоимости введенной в 1 м<sup>3</sup> бетона добавки к величине технического эффекта.

Как отмечал В.Г. Батраков [1] применение пластификаторов, снижающих водопотребность бетонной смеси при сохранении подвижности, увеличивает не только прочность отвердевшего бетона, но и его долговечность вследствие уменьшения капиллярной пористости. Снижение В/Ц уменьшает водопоглощение и водогазопроницаемость бетона, способствуя стойкости к замораживанию и оттаиванию, а также действию химических агрессивных сред. Однако, присутствие в ПФД растворимых неорганических солей [2-3], не вступающих в реакцию с цементом и продуктами его гидратации, может привести к интенсивному высолообразованию и снижению стойкости к водным агрессивным средам. В связи с этим целесообразно выявить влияние ПФД, не только на морозостойкость, но и на высолообразование и химическую стойкость.

Водопоглощение мелкозернистого бетона исследовалось на образцах размером 70×70×70 мм, которые были приготовлены из цементно-песчаного раствора (соотношение Ц:П составляло 1:3). Исследования проводились после 28 суток твердения в нормально-влажностных условиях. В качестве добавок, кроме ПФД, использовались аналоги комплексных добавок: Реламикс Т-2 в количестве 1,2 %, Sika ViscoCrete 24 HE – 0,6 % и Glenium ACE 430 – 1 % от массы Ц. Результаты исследования водопоглощения цементно-песчаных растворов приведены на рис. 1.



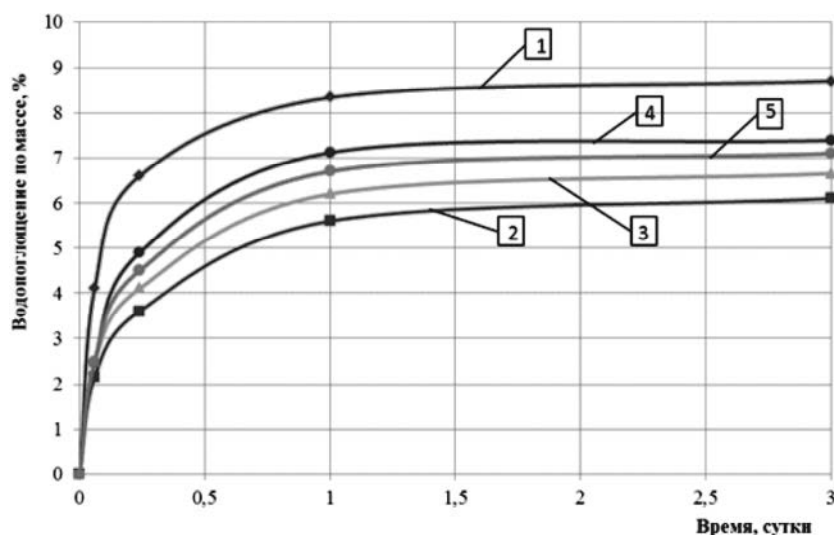


Рис. 1. Кинетика водопоглощения мелкозернистого бетона с добавками:  
1 – контрольный состав; 2 – ПФД; 3 – Реламикс Т-2;  
4 – Sika ViscoCrete 24 HE; 5 – Glenium ACE 430

Из кривых на рис. 1 видно, что величина водопоглощения образцов с ПФД ниже сравнению с контрольным составом (на 40 %) и со всеми другими комплексными добавками.

Для объяснения снижения водопоглощения образцов при введении ПФД произведен расчет пористости мелкозернистого бетона. Характеристика поровой структуры представлена в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные показатели структуры пор мелкозернистого бетона

Состав бетона с добавкой	Водонасыщение образцов через, %			Показатель среднего радиуса капилляров (вспомогательный) $\lambda_1$	Показатель однородности размеров пор, $\alpha$	Показатель среднего радиуса капилляров, $\lambda$
	15 мин $W_{t=0,25}$	1 час $W_{t=1}$	14 сут. $W_{max}$			
-	4,1	6,75	8,83	1,45	0,61	1,75
ПФД	2,15	3,60	6,80	0,80	0,45	0,61
Реламикс Т-2	2,48	4,10	6,46	1,05	0,55	1,15
SikaVisco Crete 24 HE	2,47	4,44	7,65	0,93	0,62	0,70
Glenium ACE 430	2,49	4,30	7,14	0,97	0,59	0,94

Показатели пористости определялись в соответствии с методикой ГОСТ 12730.4-78 «Бетоны. Методы определения показателей пористости» по кинетике водопоглощения. По расчетам пористости приведенных в табл. 1 видно, что добавление ПФД в мелкозернистый бетон приводит к понижению капиллярной пористости и улучшению показателей пор по сравнению с контрольным составом и аналогами комплексных добавок.

Эксплуатация строительных конструкций в условиях положительных и отрицательных температур приводит к снижению прочности тяжелого бетона [4]. Материалы, обладающие невысокой водопоглощающей способностью, лучше сохраняют свои характеристики при изменении температур.

Морозостойкость тяжелого бетона, изучалась на образцах размерами 10×10×10 см согласно методике, изложенной в ГОСТ 10060.3-95, при однократном замораживании до температуры – 20 °С.

Водонепроницаемость тяжелого бетона определялась ускоренным методом на приборе Агама-2РМ. Результаты испытания приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние ПФД и аналогов комплексных добавок на эксплуатационные характеристики<sup>1</sup>**

№	Расход материала на кг/м <sup>3</sup>				Вид и количество добавки, (%)	F, циклы	W, циклы
	Цемент	Песок	Щебень	Вода			
1	350	850	1150	189	б/д	100	6
2				112	<b>ПФД (1,3)</b>	<b>200</b>	<b>8</b>
3				137	Реламикс Т-2 (1,2)	200	8
4				133	Sika ViscoCrete 24 HE (0,6)	200	8
5				130	Glenium ACE 430 (1)	200	8

Как видно из табл. 2, при введении ПФД, водопотребность бетонной смеси снижается больше, чем с другими добавками. Снижение В/Ц, в свою очередь, способствует повышению морозостойкости бетона, т.к. капиллярная пористость уменьшается, и, следовательно, повышается морозостойкость (F) на 1-2 ступени. Снижение пористости приводит к повышению водонепроницаемости бетона (W).

Для более полного представления о качестве модифицированного цементного бетона, и конкретно, о его физико-механических свойствах, кроме прочностных характеристик, было изучено влияние ПФД и его аналогов (комплексных добавок) на деформативные свойства бетонных образцов. Необходимость оценки деформативных характеристик модифицированного бетона обусловлена его применением в ответственных несущих конструкциях и сооружениях, подвергаемым статическим и динамическим нагрузкам [5-7]. Были определены модуль упругости и призмная прочность бетона, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительные характеристики влияния ПФД и других комплексных добавок на модуль упругости и призмную прочность**

№	Компоненты смеси, кг/м <sup>3</sup>				Вид и количество добавки, (%)	Модуль упругости, ГПа	Призмная прочность, МПа
	Цемент	Песок	Щебень	Вода			
1	350	850	1150	189	-	25	33
2				112	<b>ПФД (1,3)</b>	<b>33</b>	<b>50</b>
3				137	Реламикс Т-2 (1,2)	30	47
4				133	Sika ViscoCrete 24 HE (0,6)	29	46
5				130	Glenium ACE 430 (1)	31	47

ПФД повышает модуль упругости на 32 % от контрольного бездобавочного состава, превосходя по эффективности другие комплексные добавки. Призмная прочность бетона, содержащего 1,3 % ПФД (от масс. Ц.), также выше, чем в случае применения других добавок.

Измерения линейных деформации усадки мелкозернистого бетона производились по следующей методике: в торцевые поверхности образцов-балочек 4×4×16 см заглубляют репера из нержавеющей стали, образцы хранятся в нормально-влажностных условиях (20±5) °С. Замер проводился через 1, 3, 7, 14, 28 сутки. Влияние полифункциональной добавки и добавок-аналогов на величину усадочной деформации показано на рис. 2

Из рис. 2 видно, что введение в мелкозернистый бетон добавки ПФД также как и ее аналогов, приводит к уменьшению усадки мелкозернистого бетона, причем наименьшее значение получено у состава с ПФД. Это связано, с повышенной скоростью и степенью гидратации цемента в присутствии модифицирующих добавок [8].

<sup>1</sup>Подбор состава бетона осуществлялся в соответствии ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности» по пункту 7.2.

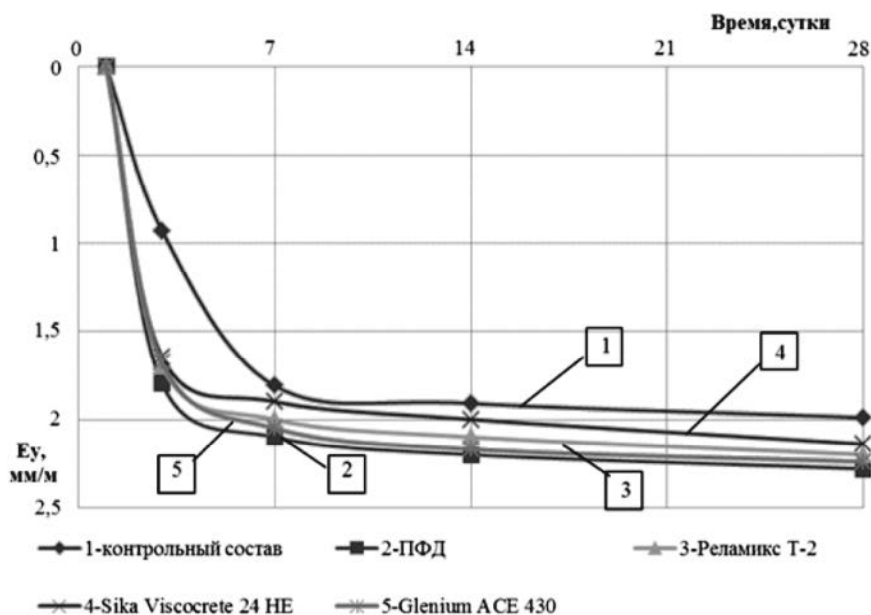


Рис. 2. Деформация усадки цементного камня с различными видами добавок

Несмотря на отсутствие ограничения в нормативной документации, высолообразование влияет на качество бетонных поверхностей [9,10]. Поэтому исследованы бетонные образцы после их испытания на высолообразование по методике, описанной в ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов (рис. 3а и 3б). Определение и оценка эффективности». Испытаны серии образцов-призм размером  $7 \times 7 \times 28$  см из бетона контрольного и основного составов, прошедшие твердение в нормально-влажностных условиях и установленные вертикально в индивидуальные емкости с водой на 3-5 см, обдуваемые воздухом с температурой  $(20 \pm 5)$  °С не менее 3 часов ежедневно в течение 7 суток. Наличие высолов на открытой поверхности образцов отмечалось визуально по появлению выцветов или налетов соли.

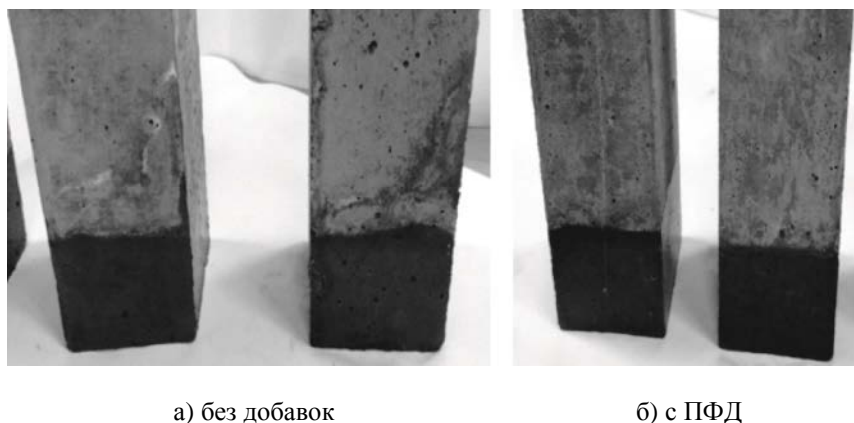


Рис. 3. Высолообразование на поверхности бетонных образцов

На рис. 3а и 3б видно, что высолообразование на поверхности образцов с полифункциональной добавкой (рис. 3б) значительно ниже по сравнению с бездобавочным составом (рис. 3а).

Коррозионную стойкость бетона определяли на образцах-балочках  $4 \times 4 \times 16$  см по методике В.В. Кинда [11]. Коэффициент стойкости  $K_c$  вычисляли как отношение величин среднего предела прочности при изгибе образцов-балочек после 120 суток нахождения их в агрессивном растворе к величине среднего предела прочности при изгибе после 120 суток нахождения их в воде. Коэффициент стойкости вычисляли с точностью до 0,01. В качестве агрессивных сред были использованы 20 %-е растворы  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaOH}$ .

Образцы-балочки были изготовлены из равноподвижных растворяемых смесей по ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Результаты испытания сульфатостойкости приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Влияние ПФД на сульфатостойкость мелкозернистого бетона

№ п/п	Дозировка ПФД, %	Прочность (МПа) на изгиб после хранения:		Прочность (МПа) на сжатие после хранения:		Коэффициент сульфатостойкости, $K_c$
		в воде	в растворе $Na_2SO_4$	в воде	в растворе $Na_2SO_4$	
1	-	7,4	2,45	50,4	10,7	0,33
2	1,3	8,3	4,67	56,2	38,4	0,56

Видно, что введение в состав бетонной смеси ПФД увеличивает сульфатостойкость бетона почти в 2 раза.

Известно, что стойкость гидратных новообразований портландцемента зависит от вида и концентрации сульфатных сред. Наименее стойким образованием в условиях сульфатных сред является гидроксид кальция. Вступая в обменные реакции с сульфатами, он образует соединения, создающие в цементном камне внутренние напряжения, приводящие к снижению прочности бетона.

Сульфат натрия вступает во взаимодействие с гидроксидом кальция по реакции:

$Na_2SO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH$ , при этом образующийся гипс повышает кристаллизационное давление в порах и капиллярах цементного камня.

Далее была изучена щелочестойкость мелкозернистого бетона с ПФД (табл. 5).

Таблица 5

#### Влияние ПФД на щелочестойкость мелкозернистого бетона

№ п/п	Дозировка ПФД, %	Прочность (МПа) на изгиб после хранения:		Прочность (МПа) на сжатие после хранения:		Коэффициент щелочестойкости, $K_{щ}$
		в воде	в растворе $NaOH$	в воде	в растворе $NaOH$	
1	-	7,4	6,9	50,4	45,6	0,93
2	1,3	8,3	9,9	56,2	48,5	1,19

Из табл. 5 видно, что введение в состав бетонной смеси ПФД также увеличивает коэффициент щелочестойкости бетона на 28 %. Это связано с тем, что на щелочестойкость большое влияние оказывает плотность бетона, которая выше у состава с ПФД.

Разработанная добавка ПФД, содержащая соли, не оказывает негативного влияния на долговечность бетона.

Таким образом, добавка ПФД в количестве 1,3 % от массы портландцемента по эксплуатационным свойствам бетона, превосходит все известные комплексные добавки на строительном рынке России.

#### Список библиографических ссылок

1. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. : Технопроект, 1998. 768 с.
2. Кашапов Р. Р., Красникова Н. М., Хозин В. Г., Шамсин Д. Р., Галеев А. Ф. Комплексная добавка на основе содосульфатной смеси // Известия КГАСУ. 2015. № 2. С. 239–243.
3. Кашапов Р. Р., Красникова Н. М., Морозов Н. М., Хозин В. Г. Влияние комплексной добавки на твердение цементного камня // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 27–30.

4. Li-kun Q. Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling // Ph. D. thesis. Dalian University of Technology. Liaoning, China. 2003
5. Baalbaki W., Aïtcin P.-C., Ballivy G. On Predicting Modulus of Elasticity in High-Strength Concrete // ACI Materials Journal. 1992. Sept.-oct. P. 517–520.
6. Gardner N. J., Zhao J. W. Creep and Shrinkage Revisited // ACI Materials Journal. 1993. may-june. P. 236–246.
7. Каприелов С. С., Карпенко Н. И., Шейнфельд А. В., Кузнецов Е. Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // Бетон и железобетон. 2003. № 6. С. 8–13.
8. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1979. 255 с.
9. Боровских И. В., Морозов Н. М. Повышение долговечности базальтовой фибры в цементных бетонах // Известия КГАСУ. 2012. № 2 (20). С. 160–165.
10. Бабков В. В., Гафурова Э. А., Резвов О. А., Мохов А. В. Проблемы высолообразования наружных стен зданий на основе вибропрессованных бетонных блоков и способы защиты стен от высолов // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7. С. 14–22.
11. Колокольников Е. И. Долговечность строительных материалов. М. : Высшая школа. 1975. 159 с.

**Kashapov R.R.** – head of laboratory

E-mail: [ramires120490@mail.ru](mailto:ramires120490@mail.ru)

**Krasnikova N.M.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: [knm0104@mail.ru](mailto:knm0104@mail.ru)

**Khozin V.G.** – doctor of technical science, professor

E-mail: [khozin@kgasu.ru](mailto:khozin@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelyonaya St., 1

### **Research of exploitative properties of cement-based heavy concretes with polyfunctional additive**

#### **Abstract**

*Problem statement.* Evaluation of physical-mechanical and exploitative properties of cement concretes with polyfunctional additive and its comparison with existing analogues are the scopes of present study.

*Results.* The main results of the research are that the developed admixture with plasticizing-accelerating-strengthening action is not inferior known analogues in its properties to frost resistance and water impermeability in concrete, and also lowers water absorption and exceeds modulus of elasticity, prismatic strength and shrinkage in comparison.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is that concretes with the developed additive increase the durability of concrete, namely, corrosion resistance (according to Moskvin II and III type of corrosion, respectively, alkali resistance, sulfate resistance).

**Keywords:** polyfunctional additive, modulus of elasticity, prismatic strength, shrinkage deformation, durability.

#### **References**

1. Batrakov V. G. Modified concrete. Theory and practice. М. : Technoprojekt. 1998. 768 p.
2. Kashapov R. R., Krasnikova N. M., Khozin V. G., Shamin D. R., Galeev A. F. Complex additive on the basis of sodalitates mixture // Izvestiya KGASU. 2015. № 2. P. 239–243.
3. Kashapov R. R., Krasnikova N. M., Morozov N. M., Khozin V. G. Influence of complex additive on the hardening of cement stone // Stroitelnye materialy. 2015. № 5. P. 27–30.

4. Li-kun Q. Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling. Ph. D. thesis. Dalian University of Technology. Liaoning, China. 2003.
5. Baalbaki W., Aïtcin P.-C., Ballivy G. On Predicting Modulus of Elasticity in High – Strength Concrete // ACI Materialy journal. 1992. sept.-oct. P. 517–520.
6. Gardner N. J., Zhao J. W. Creep and Shrinkage Revisited // ACI Materialy journal, 1993. may-june. P. 236–246.
7. Kapriellov S. S., Karpenko N. A., Seinfeld A. V., Kuznetsov E. N. On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high strength concrete with modifier MB-50C // Beton i zhelezobeton, 2003, № 6. P. 8–13.
8. Tsilosani Z. N. Shrinkage and creep of concrete. Tbilisi, 1979. 255 p.
9. Borovskikh I. V., Morozov N. M. Increase of durability of basalt fiber cement concretes // Izvestiya KGASU, 2012, № 2 (20). P. 160–165.
10. Babkov V. V., Gafurov E. A., Rezvov O. A., Mokhov A. V. Problems of efflorescence exterior walls of buildings on the basis of vibropressed concrete blocks and the ways to protect the walls from efflorescence // Ingenerno-stroitelnyi journal. 2012. № 7. P. 14–22.
11. Kolokolnikov E. I. Durability of building materials. M. : Higher school. 1975. 159 p.

УДК 622.7

**Лыгина Т.З.** – доктор геолого-минералогических наук, профессор

E-mail: [lugtal52@mail.ru](mailto:lugtal52@mail.ru)

**Лузин В.П.** – кандидат геолого-минералогических наук

E-mail: [technology-geolnerud@yandex.ru](mailto:technology-geolnerud@yandex.ru)

**Корнилов А.В.** – доктор технических наук, доцент

E-mail: [anwakor55@mail.ru](mailto:anwakor55@mail.ru)

**ЦНИИ геологии нерудных полезных ископаемых**

Адрес организации: 420097, Россия, г. Казань, ул. Зинина, д. 4

## Техногенные отходы нерудного сырья в производстве строительных материалов

### Аннотация

*Постановка задачи.* Целью работы являлась оценка возможности использования техногенных отходов нерудного сырья для получения строительных материалов.

*Результаты.* Исследованы хвосты обогащения циркон-ильменитовых песков в качестве отощающей добавки сырьевых смесей строительной керамики и заполнителя бетонов и строительных растворов. Изучена возможность извлечения мелкокоразмерного мусковита из хвостов обогащения золотосодержащих руд, глауконита из вскрышных пород месторождения цеолитсодержащего сырья.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в расширении и воспроизводстве сырьевой базы промышленности строительных материалов за счет использования техногенного полиминерального сырья (хвостов обогащения циркон-ильменитовых песков Умытгинской площади и золотосодержащих руд Олимпиадинского месторождения, вскрышных пород Татарско-Шатрашанского месторождения цеолитсодержащего сырья) и разработки ресурсосберегающих технологий. С применением хвостов обогащения песков возможно получение камней бетонных и стеновых марок по прочности М50, М75 и М150, строительных растворов марок М75 и М150, керамического кирпича марок М75-М250. Мусковитовые концентраты соответствуют по свойствам слюде типа «Слюда молотая» и могут использоваться для создания специальных покрытий, в производстве керамики, строительных растворов, красок и т.д. Глауконитовые концентраты пригодны для получения красок и объемного окрашивания строительных материалов.

**Ключевые слова:** техногенные отходы, нерудное сырье, переработка и обогащение, строительные материалы, физические свойства.

### Введение

Расширение минеральной сырьевой базы промышленности строительных материалов может быть обеспечено не только путем поиска новых месторождений нерудных полезных ископаемых, но и в результате вовлечения в производство техногенных отходов нерудного сырья. Техногенное сырье, как правило, требует рентабельной переработки и комплексной оценки с применением эффективных методов и технологий, обеспечивающих его полное использование с максимальным сохранением окружающей среды. При этом следует учитывать, что в одних случаях освоение техногенного сырья обеспечивается на основе применения новых (современных) технологий его переработки, в других случаях, его использование возможно по улучшенным традиционным технологиям.

Промышленная переработка техногенного сырья (отходы обогащения и переработки, вскрышные и вмещающие породы), близкого по составу к природному и используемого в традиционных направлениях, практически не отличается от промышленной переработки природного минерального сырья.

Создание эффективных технологий переработки техногенного сырья, позволяющих получать из него конкурентоспособную продукцию для различных областей промышленности, является актуальной задачей. В данном направлении проводится большой объем исследований.

Установлено, что для получения пористых керамических стеновых материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками могут быть использованы в качестве эффективных технологических добавок к глинистому сырью карбонатсодержащие отходы горнодобывающей, пищевой и других отраслей промышленности [1], туфовые отходы и мелкозернистый вермикулит [2]. Используя последние два вида отходов можно улучшить теплоизоляционные свойства и гипсовых изделий [3].

С использованием отходов добычи нерудного сырья разработаны эффективные композиционные вяжущие, на основе хвостов обогащения вермикулитовых и апатит-нефелиновых руд получена строительная керамика (облицовочная плитка, полнотелый, пустотелый и гиперпрессованный кирпич) с улучшенными эксплуатационными свойствами. Из отхода обогащения асбестовых руд (серпентинита) возможно получение жидкого стекла высокой степени чистоты [4].

Отходы добычи и переработки некондиционного минерального сырья могут использоваться для приготовления строительных смесей [5].

Возможно использование кварцевых отходов переработки железной руды и хвостов апатито-нефелиновой флотации в производстве ячеистых бетонов [6]. В производстве газобетонных изделий могут применяться и другие техногенные отходы [7].

Получены новые строительные материалы из вскрышных пород (сланцевых псаммитов-алевроитов-глинистых продуктов коры выветривания карбонатитов и метасоматитов) Татарского редкометального месторождения Красноярского края. Вермикулитовые концентраты могут быть применены в качестве заполнителя легких бетонов, для приготовления штукатурных растворов – огнезащитных, теплоизоляционных и звукопоглощающих, в сельском хозяйстве, в природоохранных мероприятиях, а также в новом направлении, а именно для получения керамзитового гравия [8].

Для вскрышных пород Софроновского месторождения фосфоритов (расположено в Ямало-Ненецком автономном округе) разработаны технологии получения пигментов (марок типа «Охра») и керамических стеновых материалов, удовлетворяющих требованиям стандартов [8].

Показано, что отходы флотационного обогащения мусковитовых руд являются пригодными для производства огнеупоров и плит. Переработка отходов обогащения гетит-гидрогетитовых руд позволила получить тонкодисперсный коричневого цвета продукт класса  $-0,050+0,0$  мм, который по содержанию  $Fe_2O_3$  отвечает техническим условиям на минеральные пигменты марок типа «Охра» [9].

Для получения легковесной керамики могут применяться как природные, так и техногенные образования цеолитсодержащих кремнистых пород [10].

### Результаты

На основе изучения технологической минералогии были впервые разработаны и предложены к применению эффективные технологические схемы обогащения мелкозернистых слюд и глауконита и технологические схемы получения строительных материалов на основе отходов горного производства циркон-ильменитовых песков применительно к определенным объектам комплексного минерального сырья.

Установлена возможность использования хвостов гравитационного обогащения (ХГО) циркон-ильменитовых песков Умытгинской площади Ханты-Мансийского автономного округа – ЮГРА в производстве строительных материалов, изготовленных по безобжиговой технологии с применением цемента, извести и гипса, а также по обжиговой технологии в смеси с глиной.

Твердые зернистые отходы гравитационного обогащения по модулю крупности 0,2 согласно классификации ГОСТ 8736 «Песок для строительных работ» относятся к группе очень тонких песков (модуль крупности до 0,70).

Рентгенографическим количественным фазовым анализом в составе отходов установлено наличие кварца – 86 %, полевых шпатов – 11 % и глинистых минералов – около 3 %. Скопления глинистых минералов отмечаются в углублениях агрегатов кварца и полевого шпата.

Наиболее высокое содержание установлено для компонентов:  $SiO_2$  – 93,73,  $Al_2O_3$  – 3,40,  $K_2O$  – 1,62 %. Содержание других химических составляющих не превышает 1,0 %.



Насыпная плотность песка составляет  $1,44 \text{ г/см}^3$ , истинная плотность –  $2,62 \text{ г/см}^3$ , пустотность – 45 %.

Образцы строительных изделий (в виде призм размерами  $160 \times 40 \times 40 \text{ мм}$ ) изготавливались из сырьевых смесей отходов с гипсом строительным (ГОСТ 125), известью строительной (ГОСТ 9179) и цементом марки М 400 (ГОСТ 10178). Их твердение происходило в естественных условиях. Физические свойства полученных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Физические свойства лабораторных строительных изделий

Состав смеси		Физические свойства изделий			
		Плотность, $\text{кг/м}^3$	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %
50 % песка	50 % гипса	1660	3,2	7,8	11,7
20 % песка	80 % извести	1600	0,3	0,7	15,1
75 % песка	25 % цемента	1790	4,1	19,5	9,6

Образцы строительных изделий на основе сырьевой смеси «песок ХГО + гипс»:

- по ГОСТ 6428 «Плиты гипсовые для перегородок» отвечают требованиям на гипсовые плиты, предназначенные для устройства перегородок в зданиях различного назначения с сухим и нормальным режимами помещений, по прочности на сжатие и изгибе, но не удовлетворяют требованиям этого ГОСТ из-за повышенной плотности ( $1660 \text{ кг/м}^3$  вместо нормируемых  $1100\text{-}1350 \text{ кг/м}^3$ );

- по ГОСТ 6133 «Камни бетонные и стеновые» отвечают требованиям на типоразмеры камней СКГ-1 и СКГ-1А (целый камень, марка 75) и СКГ-2 (продольная половина, марка 75) как по прочности на сжатие, так и по плотности. По плотности строительные изделия относятся к тяжелым (плотность больше  $1650 \text{ кг/м}^3$ );

- по ГОСТ 28013 «Растворы строительные» отвечают требованиям по прочности на сжатие на растворы марки М75. По средней плотности строительные растворы относятся к тяжелым (плотность больше  $1500 \text{ кг/м}^3$ ). По максимальной крупности зерен (меньше  $1,25\text{-}2,5 \text{ мм}$ ) песок может быть использован в качестве заполнителя для кладочных, штукатурных накрывочного слоя растворов и облицовочных растворов.

Образцы строительных изделий на основе сырьевой смеси «песок ХГО + известь»:

- по ГОСТ 6133 «Камни бетонные и стеновые» не отвечают требованиям на стеновые камни, поскольку у них прочность на сжатие меньше  $2,5 \text{ МПа}$ ;

- по ГОСТ 28013 «Растворы строительные» отвечают требованиям по прочности на сжатие на растворы марки М4. По средней плотности строительные растворы относятся к тяжелым (плотность больше  $1500 \text{ кг/м}^3$ ). По максимальной крупности зерен (меньше  $1,25\text{-}2,5 \text{ мм}$ ) песок может быть использован в качестве заполнителя для кладочных, штукатурных накрывочного слоя растворов и облицовочных растворов.

Образцы строительных изделий на основе сырьевой смеси «песок ХГО + цемент»:

- по ГОСТ 6133 «Камни бетонные и стеновые» отвечают требованиям на типоразмеры камней СКЦ-1 (целый камень) и СКЦ-2 (продольная половина) марки 150, а также типоразмеру камня СКЦ-3 (перегородочный камень) марки 50.

- по ГОСТ 28013 «Растворы строительные» отвечают требованиям по прочности на сжатие на растворы марки М150. По средней плотности строительные растворы относятся к тяжелым (плотность больше  $1500 \text{ кг/м}^3$ ). Морозостойкость составляет более 28 циклов. По максимальной крупности зерен (меньше  $1,25\text{-}2,5 \text{ мм}$ ) песок может быть использован в качестве заполнителя для кладочных, штукатурных накрывочного слоя растворов и облицовочных растворов.

Учитывая хорошее взаимодействие с цементом, исследованный песок ХГО можно планировать к применению в качестве добавки для понижения модуля крупности песков, используемых в бетонах гидротехнических сооружений и других бетонах всех видов конструкций и изделий.

При исследовании возможности утилизации отходов в производстве керамических материалов в качестве глинистого сырья использовались высокодисперсная и

низкодисперсная глины, отличающиеся по вещественному и гранулометрическому составам. Содержание тонкодисперсных фракций (размером менее 10 и менее 1 мкм) в одной глине составляет соответственно 87,2 и 63,4 %, в другой – 47,5 и 25,6 %. По классификации ГОСТ 9169 «Сырье глинистое для керамической промышленности» первая глина является высокодисперсной, вторая – низкодисперсной.

Высокодисперсная глина является полиминеральной и сложена такими минералами, как монтмориллонит 34, гидрослюда 11, каолинит 11, хлорит 5, кальцит 21, кварц 16, полевые шпаты 2 %.

В химическом составе глины преобладают:  $\text{SiO}_2$  – 44,80,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 15,83,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5,21,  $\text{CaO}$  – 12,41,  $\text{MgO}$  – 1,97,  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,60 %. Содержание других химических составляющих не превышает 1,0 %.

Содержание крупнозернистых включений с размером частиц больше 0,5 мм в глине составляет 0,6 %.

Обжиг высушенных сырцовых образцов в естественных условиях осуществлялся в муфельной электропечи при температуре 1000 °С. Физические свойства приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Физические свойства лабораторных керамических изделий

Песок ХГО	Сырьевая смесь, %		Свойства керамических изделий			
	Глина		Прочность, МПа		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %
	Высоко дисперсная	Низко дисперсная	при изгибе	при сжатии		
10	90	-	-*	-	-	-
20	80	-	-*	-	-	-
30	70	-	8,7	15,6	1730	13,7
50	50	-	4,6	16,4	1780	14,0
10	-	90	7,0	39,9	2040	11,8
20	-	80	6,6	49,4	1960	9,9
30	-	70	5,2	26,0	2010	10,9
50	-	50	2,6	18,3	1860	10,9

Примечание: 1) образцы имеют большое количество трещин; 2) морозостойкость всех образцов составляет более 28 циклов.

Образцы керамических изделий, содержащие добавку песка ХГО в количестве 30-50 %, имеют прочность при сжатии 15,6-16,4 МПа, при изгибе – 4,6-8,7 МПа.

Лабораторные образцы керамических изделий, полученные из сырьевой смеси, в которой содержится 10-20 % песка ХГО, не пригодны для изготовления прочных керамических изделий вследствие образующихся при обжиге большого количества открытых трещин.

Низкодисперсная глина также является полиминеральной. В ее составе установлено 7 минералов, в том числе (% мас.): монтмориллонит – 32, слюда – 17, хлорит – 14, кварц – 23, плагиоклаз – 11, амфиболы – 1, кальцит – 2.

Химический состав глины (% мас.):  $\text{SiO}_2$  – 62,86,  $\text{TiO}_2$  – 0,93,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 14,35,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 6,21,  $\text{MgO}$  – 0,10,  $\text{CaO}$  – 2,27,  $\text{MgO}$  – 2,62,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 2,15,  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,15,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,16,  $\text{SO}_3$  общ < 0,05, ппп – 6,32,  $\text{CO}_2$  – 0,92.

Содержание крупнозернистых включений +0,5 мм в глине составляет 0,8 %.

Лабораторные образцы керамических изделий, полученные из низкодисперсной глины с добавкой 10-50 % песка ХГО, имеют прочность при сжатии 18,3-49,4 МПа, при изгибе – 2,6-7,0 МПа. Наиболее высокие показатели по прочности при сжатии (39,9-49,4 МПа) имеют керамические образцы с содержанием 10-20 % песка ХГО. Наименьшая прочность при сжатии (18,3 МПа) имеет керамика, содержащая 50 % песка ХГО.

Изготовленные в виде кирпича и (или) камня изделия могут быть применены для кладки и облицовки несущих и самонесущих стен и других элементов зданий и сооружений. Полнотельный кирпич пригоден также для кладки фундаментов. Прогнозная марка кирпича из высокодисперсной глины М75, из низкодисперсной глины – М100-М250.

Таким образом, показана пригодность песков ХГО для использования в качестве отощающей добавки в сырьевые смеси строительной керамики, заполнителя при получении строительных изделий (бетонных и стеновых камней, штукатурных, кладочных, облицовочных и накрывочного слоя растворов и др.) на основе портландцемента, гипса и извести.

Изучена возможность извлечения из хвостов обогащения золотосодержащих руд Олимпиадинского месторождения мелкозернистого мусковита.

Содержание мусковита в отходах составляет 20,9 %. Такое содержание относится к высоким, так как по известным месторождениям России в учтенных запасах оно варьирует от долей процента до 20,7 %. Максимальный размер частиц продукта не превышал 1,0 мм.

По массовой доле основных химических компонентов ( $\text{SiO}_2$  – 45,56,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 33,86,  $\text{K}_2\text{O}$  – 9,10,  $\text{H}_2\text{O}$  – 5,43 %) олимпиадинский мусковит имеет незначительные отклонения от высококачественного крупнокристаллического (листового) алданского мусковита ( $\text{SiO}_2$  – 51,61,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 28,79,  $\text{K}_2\text{O}$  – 9,10,  $\text{H}_2\text{O}$  – 4,07 %) и теоретического состава мусковита как минерала ( $\text{SiO}_2$  – 45,20,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 38,50,  $\text{K}_2\text{O}$  – 11,80,  $\text{H}_2\text{O}$  – 4,50 %). В отходах агрегаты мусковита хорошо вскрыты, большая часть их сосредоточена в продукте фракции – 0,05+0,00 мм.

На практике слюда -0,05+0,00 мм считается трудно извлекаемой и, как правило, перед основной флотацией направляется полностью вместе с другими имеющими место минералами в отвалы. Реже перед основным обогащением слюдосодержащий продукт подвергается обесшламливанию по несколько тонкому классу –0,02+0,0 мм, но при этом потери слюды на примере данного объекта составили бы около 32 %.

Для решения проблемы извлечения из отходов слюды –0,05+0,00 мм в концентрат был проведен комплекс технологических исследований. Применительно к изучаемому минеральному сырью установлена бесперспективность обогащения мусковита способом по узким фракциям крупности на ситах, гравитационным методом и электрической сепарацией. Наиболее эффективное извлечение мусковита достигнуто способом прямой флотации без применения операции по обесшламливанию и вспомогательных работ по перемешиванию мусковитовых концентратов (А.с. 1344419 (СССР). Способ обогащения мелкозернистого мусковита / Лузин В.П., Лузина Л.П. № 3980260/22-03; Заявлено 25.11.87. Опубл. 15.10.87. Бюл. 38). Это позволило получить мусковитовые концентраты, сложенные на 98,8 % частицами фракции –0,05+0,0 мм. Извлечение мусковита в концентрат достигнуто на уровне 74,8 %. При среднем содержании мусковита 83,6 % выход мусковитового концентрата в целом составил 17,2 %. Гибкость технологической схемы дала возможность целенаправленно получать не только один усредненный по качеству концентрат, но и выделять несколько различающихся по содержанию мусковита концентратов, например, с содержанием мусковита 90,1-98,5 % (соответственно при выходе 11,1 и 4,9 %) или с содержанием мусковита 71,6-77,4 % (соответственно при выходе 12,3 и 6,1 %). При этом обеспечивается степень обогащения до 4, степень сокращения – до 5,8.

Дополнительные затраты на получение мусковитового концентрата не потребуются, так как расходы на добычу руды, ее дробление и измельчение будут отнесены на производство основного полезного ископаемого, золота. Флотационный способ производства мелкозернистого мусковита более экономичен в сравнении с действующими в отечественной практике методами, основанными на дроблении и помоле традиционного слюдяного сырья – рудничных и фабричных скрапов, обогащенного сырца и отходов обработки крупнокристаллического мусковита. Стоимость производства флотационного мусковитового концентрата в 18-34 раза дешевле стоимости техногенной дробленой и молотой слюды. После извлечения мусковита в составе отходов остаются такие минералы, как карбонаты (доломит, кальцит), кварц, хлорит, полевой шпат и другие минералы. Схема флотации мелкозернистого мусковита представлена на рис.



Рис. Схема флотации мелкоразмерного мусковита из отходов неслюдяного производства

Получаемые при обогащении мусковитовые концентраты отвечают мелкоразмерной слюде промышленного типа «Слюда молотая» – порошкообразный продукт с размером частиц меньше 0,315 мм (ГОСТ 10698 «Слюда. Типы, марки и основные параметры»). Она может использоваться для создания химически устойчивых, водостойких, жаро- и морозостойких покрытий; приготовления формовочных смесей, буровых растворов; в производстве керамики, противопожарных и электроизоляционных материалов; в качестве наполнителя для бумаги, пенополиуретана, пластмасс, линолеума, резины, лакокрасочных материалов; заполнителя бетонов, замазки, штукатурных и затирочных растворов и т.д.

Перспектива освоения слюдосодержащих отходов подтверждается также тем, что стоимость попутно получаемой слюдяной товарной продукции приблизительно равна стоимости основного полезного ископаемого – золота, извлекаемого из одного и того же количества перерабатываемой руды. Цена 1 т мелкоразмерной слюды на мировом рынке составляет от 200 до 430 USD/т (БИКИ № 21 [9267] 21.02.2008 г.). С учетом этих цен стоимость слюдяного концентрата, получаемого из 1 т обогащением отходов, ориентировочно составит 34-74 долларов.

Вещественный и гранулометрический составы отходов (хвостов) обогащения, образующихся после извлечения мусковита, позволяют прогнозировать применение их в качестве мелкого заполнителя строительных бетонов, кладочных, штукатурных и затирочных растворов, минерального порошка для асфальтобетонных смесей и в других направлениях. Рациональное использование отходов разработки месторождения, с одной стороны, позволит улучшить (сохранить) экологическую обстановку на территории горно-обогатительного предприятия, а с другой стороны, расширить сырьевую базу для производства строительных материалов и уменьшить их дефицит.

Решен вопрос о возможном извлечении и последующей утилизации глауконита из вскрышных пород Татарско-Шатрашанского месторождения цеолитсодержащего сырья в Республике Татарстан, представленных сцементированными серого цвета зернистыми песчано-алеврит-глинистыми отложениями (песчаниками).

Глауконитсодержащие породы содержат глауконита 21,39-29,34 (в среднем 26,29 % мас.), опал-кристаллита 8-36, цеолитов 14-24, карбоната 10-19, кварца 4-13, полевого шпата около 1 %. Другие минералы: апатит, мусковит, пирит имеют подчиненное значение. Их количество обычно оценивается долями процентов и реже свыше 1 %. Из аксессуаров следует отметить ильменит, циркон, рутил, гранат, турмалин.

Химический состав глауконитовых песков довольно устойчив:  $\text{SiO}_2$  – 56,60-76,78;  $\text{TiO}_2$  – 0,41-0,52;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 6,60-9,82;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4,07-6,90;  $\text{CaO}$  – 0,94-6,22;  $\text{MgO}$  – 0,78-1,94;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,21-2,69,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,35-1,38;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,17-3,08 %.

Глауконит относится к группе гидрослюдов (гидромусковит, гидробиотит, гидрофлогопит, глауконит и др.), представляющих собой гидратизированной формы слоистые силикаты с морфологически чешуйчатым строением. Кристаллическая структура его представляет промежуточный тип между структурой слюды и монтмориллонита. Во вскрышных породах представлен преимущественно двумя классами крупности: крупным классом  $-0,5+0,05$  мм и мелким классом  $-0,05+0,00$  мм. Основная масса глауконита сосредоточена во фракции  $-0,5+0,05$  мм. Форма зерен различная – шаровидная, округлая, почковидная, столбчатая, червеобразная и т.д. Каждое отдельное зерно в большинстве случаев характеризуется сложным строением. Центральная часть (ядро) обычно отличается более темной окраской (черно-зеленой, темно-зеленой или зеленой) в сравнении с окраской внешней оболочки (рубашки), которая равномерно покрывает (обволакивает) ядро, имеет светлую серовато-зеленую (иногда оливковую) окраску, стеклянный блеск и, очевидно, несколько другой вещественный состав. Глауконит не содержит и не выделяет токсических веществ.

Одной из примечательных особенностей является то, что глауконит размером меньше 0,16 мм отличается по цвету от более крупного глауконита светлыми тонами и имеет преимущественно оливковый (желтовато-зеленый) цвет, темно-окрашенных (черно-окрашенных) темно-зеленых зерен значительно меньше (находятся в починенном количестве). Таким образом, разделяя глауконит по крупности зерен, можно получить из него пигменты различного цвета (от темно- до светло-зеленого). Глауконит размером зерен больше 0,50 мм в составе проб не зафиксирован. Здесь следует отметить, что глауконит класса  $-0,05+0,00$  мм является трудно определяемым по содержанию и труднообогащаемым. Запасы глауконита целесообразно учитывать по доступному к извлечению классу этого минерала при обогащении современными способами. Не извлекаемый глауконит следует относить к обычным породообразующим минералам, не имеющим практического значения.

Оценка технической характеристики исследуемого сырья позволила сделать следующие выводы: а) низкое содержание глауконита в исходной породе не позволяет применять ее в качестве тех глауконитовых концентратов, которые могли быть применены в качестве красящих пигментов; б) глауконит для использования в качестве пигментов для производства силикатных, цементных, масляных и других видов красок, а также для объемного окрашивания строительных материалов может быть получен в виде концентратов путем обогащения вскрышных пород.

С целью определения получения высококачественных глауконитовых концентратов было разработано и апробировано несколько технологических схем извлечения глауконита на основе метода обогащения рассевом на ситах, флотации, электрической сепарации, электромагнитной сепарации и химических способов.

В процессе обогащения способом механического отсева на ситах по узким классам крупности происходит неравномерное вскрытие зерен глауконита и других породообразующих минералов. Так, в классе  $-5,00+0,50$  мм вскрытые зерна глауконита отсутствуют, в классе  $-0,50+0,40$  мм содержание их не превышает 1,0 %, в классе  $-0,40+0,05$  мм содержание таких зерен по пробам изменяется от 1,0 до 80 %, в классе  $-0,050+0,022$  мм присутствие свободных агрегатов находится на уровне 10 %. Наличие частиц глауконита меньшего размера в количественном отношении установить не представилось возможным. Глауконитовые концентраты с содержанием полезного компонента в пределах 50-80 % можно применять для объемного окрашивания строительных материалов, изготавливаемых из белого портландцемента, извести и гипса. Однако выход концентратов такого качества незначителен, большая часть глауконита при таком способе обогащения будет утеряна.

Применение способа флотации для получения глауконитовых концентратов на данном этапе достижений технологии обогащения оказалось бесперспективным, поскольку в породе присутствуют цеолиты, которые, являясь сорбентами, интенсивно поглощают применяемые флотореагенты и тем самым препятствуют пенообразованию, без которого выделение минералов в концентрат не происходит.

Электрическое обогащение проводилось на микроэлектросепараторе МЭП-2. Обработка и анализ результатов исследований показали на бесперспективность применения электрической сепарации в целях получения глауконитовых концентратов из вскрышных пород, ибо четкого разделения их на отдельные минералы не происходит.

Электромагнитное обогащение проводилось с применением электромагнитного сепаратора СЭМ-1. Учитывая, что глауконитовые зерна начинают вскрываться только после дробления материала пробы с получением частиц меньше 0,40 мм и возможности электромагнитного извлечения зерен размером не меньше 0,05 мм, опытные основные работы были поставлены по обогащению продукта фракции  $-0,40+0,05$  мм. Выход электромагнитной фракции (глауконитового концентрата) составляет по пробам от 24,6 до 53,90 % по операции обогащения, а ко всей массе вскрышных пород от 11,39 до 26,34 % (табл. 3).

Таблица 3

**Результаты электромагнитной сепарации  
по выделению глауконитового концентрата фракции  $-0,40+0,05$  мм**

№ образца	Выход продуктов обогащения, %		
	Глауконитовый концентрат (электромагнитная фракция)	Промпродукт	Хвосты (неэлектромагнитная фракция)
1	44,00* (19,43**)	8,30* (3,67**)	47,70* (21,07**)
2	52,60 (26,34)	7,40 (3,71)	40,00 (20,03)
3	24,60 (11,39)	27,80 (12,87)	47,60 (22,04)
4	53,90 (22,00)	8,80 (3,57)	37,30 (15,20)

Примечание: 44,00\* – выход продукта обогащения по операции из навески песка фракции  $-0,40+0,05$  мм; (19,43\*\*) – выход продукта обогащения ко всей, взятой на испытание исходной навески песка фракции  $-0,40+0,05$  мм.

Электромагнитная фракция по результатам макроскопического и микроскопического изучения представлена в основном глауконитом, среди зерен которого встречаются единичные зерна сопутствующих породных частиц кремнистого и карбонатного составов и гидроксидов железа.

Промежуточные продукты в основной массе представлены глауконитом, но в них содержание породных примесных частиц больше, чем в концентрате. При снижении требований к основному глауконитовому концентрату они могут быть соединены.

Хвосты (отходы) представлены кремнистыми, карбонатными и другими породными частицами. Зерна глауконита в них единичны.

Повышенное содержание карбонатов во вмещающей породе создает благоприятное условие для их химического обогащения с целью возможного получения минерального сырья с более высоким содержанием глауконита, цеолитов, опала и опал-кristобалитовых минералов. Химическое обогащение можно проводить с применением концентрированной соляной кислотой или слабыми ее растворами. Выход нерастворимого остатка по пробам различен и варьирует от 41,50 до 79,00 %. При необходимости производства особо чистого глауконитового концентрата обогащение можно осуществлять по усложненной технологической схеме, состоящей из нескольких способов извлечения, например из химического обогащения и электромагнитной сепарации.

Высококачественные, практически мономинеральные глауконитовые концентраты можно применять в качестве пигмента для производства силикатных, цементных, и других видов красок. Глауконитовые краски можно изготавливать на водной и масляной основе, они стойки к кислотам, щелочам и атмосферным влияниям. Возможные цвета красок с применением одного глауконитового пигмента и в смеси пигментов «глауконит + крон желтый фталциониновый» приведены в табл. 4.

Физические и химические свойства красок, изготовленных с применением глауконита, отвечают требованиям действующих стандартов (ГОСТ 6465 и ГОСТ 8289).

В естественном виде тонкомолотый глауконит может быть применен для объемного окрашивания в зеленый цвет различных строительных материалов, изготовленных с применением белого и серого портландцемента (том числе бетонных блоков), извести и гипса. Эти материалы можно использовать для внутренней и внешней отделки зданий и сооружений, а также покрытий тротуаров, дорожной брусчатки, бордюров и т.д.

Таблица 4

**Некоторые цвета красок, полученных с применением глауконита**

№ образца	Цвет краски	Составные компоненты красок
1	Сиена коричневая	Глауконит + алкидный лак
2	Защитный	Глауконит + алкидный лак + крон желтый фталциониновый
3	Травянисто-зеленый	Глауконит + алкидный лак + крон желтый фталциониновый
4	Умбра болотный	Глауконит + алкидный лак
5	Сине-зеленый	Глауконит + олифа + крон желтый фталциониновый
6	Темно-зеленый	Глауконит + олифа + крон желтый фталциониновый

Примечание. Состав пигментов: глауконит 30-100 %, крон желтый 1,5-10,0 %.

При нагреве до 900 °С глауконит постепенно изменяет зеленый цвет на бежевый, розовый до темно-коричневого, который в свою очередь при измельчении потемневших гранул преобразовывается в бурый цвет. Таким образом, глауконит может быть применен не только в качестве основного зеленого пигмента, но и качестве пигмента серовато-желтой или другой окраски.

Предварительно оцененные запасы глауконита составляют 250-300 тыс. т. Они могут быть увеличены за счет освоения глауконитсодержащих пород, подстилающих цеолитсодержащую толщу.

**Заключение**

В современных условиях актуально расширение отечественной сырьевой базы промышленности строительных материалов не только за счет более рационального использования сырья, но и его переоценки с позиции выявления новых направлений использования с учетом улучшения его качества. В связи с этим необходимо разрабатывать новые технологии переработки и обогащения нерудного сырья, вовлекать в производство местные нетрадиционные его виды, а также техногенные отходы.

Показана возможность комплексного использования техногенного полиминерального сырья (хвостов обогащения циркон-ильменитовых песков Умытгинской площади и золотосодержащих руд Олимпиадинского месторождения, вскрышных пород Татарско-Шатрашанского месторождения цеолитсодержащего сырья) в производстве строительных материалов (бетонных и стеновых камней, керамических кирпичей, строительных растворов, пигментов для красок и строительных изделий) с высокими эксплуатационными характеристиками, что дает основание рассматривать его инвестиционно-привлекательным. Разработаны эффективные технологические схемы обогащения техногенных отходов, оптимизированы технологические режимы (содержание отходов в смеси, гранулометрический состав компонентов, температура и продолжительность обжига и др.) переработки сырьевых смесей с отходами.

**Список библиографических ссылок**

1. Хайдаров Р. А., Гайнуллин Р. И., Корнилов А. В., Коршунов А. Н. Карбонатсодержащие техногенные отходы для производства пористой строительной керамики // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 7. С. 288.
2. Лузин В. П., Корнилов А. В., Николаев К. Г., Лузина Л. П. Керамические строительные материалы с улучшенными теплоизоляционными свойствами // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 8. С. 32–36.
3. Лузин В. П., Корнилов А. В., Лузина Л. П. Улучшение теплоизоляционных свойств гипсовых материалов и изделий путем применения нетрадиционных минеральных наполнителей: труды XI Международного симпозиума. Часть 2. / Центр оперативной печати. Казань, 2010. С. 57–64.

4. Лыгина Т. З., Корнилов А. В. Применение природного и техногенного сырья в производстве строительных материалов и изделий (по материалам Международного совещания) // Строительные материалы. 2010. № 11. С. 60.
5. Голик В. И., Цидаев Т. С., Цидаев Б. С. Методика использования хвостов переработки некондиционного минерального сырья // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 12. С. 27–29.
6. Пак А. А. К вопросу использования техногенных отходов предприятий Мурманской области в ячеистых бетонах // Строительные материалы. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 8. С. 18–19.
7. Oreshkin D. V., Chebotaev A. N., Perfilov V. A. Disposal of drilling Sludge in the production of building materials // Procedia Engineering III. 2015. P. 607–611.
8. Лыгина Т. З., Лузин В. П., Корнилов А.В. Многоцелевое использование техногенного нерудного сырья и получение из него новых видов продукции: материалы XXII Международной научно-технической конференции / Форт Диалог-Исеть. Екатеринбург, 2017. С. 67–71.
9. Lygina T., Kornilov A. Modern technological mineralogy – tool for evaluation of industrial minerals properties : Book of Papers. XIV Balkan Mineral Processing Congress. Volume I / Tuzla, 2011. P. 450–454.
10. Kazantseva Lidia K., Lygina Talia Z., Rashchenko Sergey V., Tsyplakov Dmitry S. Preparation of Sound-Insulating Lightweight Ceramics from Aluminosilicate Rocks with High CaCO<sub>3</sub> Content // The American Ceramic Society. 2015. P. 1–5.

**Lygina T.Z.** – doctor of geological and mineralogical sciences, professor

E-mail: [lygtal52@mail.ru](mailto:lygtal52@mail.ru)

**Luzin V.P.** – candidate of geological and mineralogical sciences

E-mail: [technology-geolnerud@yandex.ru](mailto:technology-geolnerud@yandex.ru)

**Kornilov A.V.** – doctor of technical sciences, associate professor

E-mail: [anwakor55@mail.ru](mailto:anwakor55@mail.ru)

**CSRI of Geology of Industrial Minerals**

The organization address: 420097, Russia, Kazan, Zinin st., 4

## Technogenic waste of non-metallic raw materials in the building materials production

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the work was to assess the possibility of using technical waste of non-metallic raw materials for building materials.

*Results.* The tails of enrichment of zircon-ilmenite sands have been investigated as a depleting additive of raw mixtures of building ceramics and aggregate for concretes and mortars. The possibility of extracting small-sized muscovite from tailings of enrichment of gold-bearing ores, glauconite from overburden rocks of the deposit of zeolite-containing raw materials was studied.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the expansion and reproduction of the raw materials base of the building materials industry through the use of technogenic polymineral raw materials (tails of enrichment of zircon-ilmenite sand of Umytyinskaya area and gold-bearing ores of the Olimpiadinskoye deposit, overburden rocks of the Tatar-Shatrashan deposit) and the development of resource-saving technologies. With the use of tails of enrichment of zircon-ilmenite sands, it is possible to obtain stone-concrete and wall marks for the strengths of M50, M75 and M150, mortars of M75 and M150 grades, ceramic bricks of M75-M250 grades. Muscovite concentrates correspond to the properties of small-sized mica of industrial type «Mica milled» and can be used to create special coatings, in the production of ceramics, construction solutions, paints, etc. Glauconite concentrates are suitable for the production of paints and volumetric staining of building materials.

**Keywords:** technogenic waste, non-metallic raw materials, processing and enrichment, building materials, physical properties.



### References

1. Khajdarov R. A., Gajnullin R. I., Kornilov A. V., Korshunov A. N. Carbonate-containing technogenic waste for production of the porous building ceramics // Vestnik Kazan technological university. 2011. № 7. P. 288.
2. Luzin V. P., Kornilov A. V., Nikolaev K. G., Luzina L. P. Ceramic building materials with improved thermal insulation properties // Vestnik Kazan technological university. 2010. № 8. P. 32–36.
3. Luzin V. P., Kornilov A. V., Luzina L. P. Improving the thermal insulation properties of gypsum materials and products by using non-traditional mineral fillers: dig. of art. International XI Symposium. Part 2. / Centr operativnoy pechati. Kazan, 2010. P. 57–64.
4. Lygina T. Z., Kornilov A. V. The use of natural and technogenic raw materials in the production of building materials and products // Building materials. 2010. № 11. P. 60.
5. Golik V. I., Cidaev T. S., Cidaev B. S. A method of use of processing wastes of mineral raw materials // Building materials. 2012. № 12. P. 27–29.
6. Pak A. A. On the use of technogenic wastes of enterprises of the Murmansk region in cellular concrete // Building materials. 2013. № 8. P. 18–19.
7. Oreshkin D. V., Chebotaev A. N., Perfilov V. A. Disposal of drilling Sludge in the production of building materials // Procedia Engineering III. 2015. P. 607–611.
8. Lygina T. Z., Luzin V. P., Kornilov A. V. Multipurpose use of man-made non-metallic raw materials and obtaining new types of products from it: dig. of art. of the XXII International scientific-technical conference / Fort Dialog-Iset. Ekaterinburg, 2017. P. 67–71.
9. Lygina T., Kornilov A. Modern technological mineralogy – tool for evaluation of industrial minerals properties : Book of Papers. XIV Balkan Mineral Processing Congress. Volume I / Tuzla. 2011. P. 450–454.
10. Kazantseva Lidia K., Lygina Talia Z., Rashchenko Sergey V., Tsyplakov Dmitry S. Preparation of Sound-Insulating Lightweight Ceramics from Aluminosilikate Rocks with High CaCO<sub>3</sub> Content // The American Ceramic Society. 2015. P. 1–5.

УДК 625.7

**Фомин А.Ю.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [fomin-al.78@mail.ru](mailto:fomin-al.78@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Асфальтобетон для дорожных работ на основе низкомарочного щебня, усиленного серой**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы является разработка эффективного дорожного асфальтобетона на основе щебня из малопрочных невестребованных минеральных пород осадочного происхождения.

*Результаты.* На основе низкомарочного щебня из осадочных пород, получен высокопрочный строительный щебень марки М1000-1200, путем его поверхностной обработки расплавом серы. Установлено, что щебень обладает рядом положительных свойств: гидрофобностью, сравнительно высокой морозостойкостью и маркой по дробимости, низким водопоглощением. В результате взаимодействия асфальтового вяжущего с поверхностью частиц щебня, на границе раздела формируется градиентный слой, повышающий когезионную прочность структуры асфальтобетона. Установлено, что асфальтобетон на основе укрепленного щебня соответствует требованиям ГОСТ.

*Выводы.* Организация промышленного производства щебня, обработанного серой, и асфальтобетонов на его основе позволило бы снизить объем прямых затрат на приобретение высокопрочного щебня и из изверженных пород и его транспортировку, снизить сметную стоимость строительства и ремонта автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, вяжущее, сера, щебень, усиление, структура.

Одним из возможных источников пополнения материальных ресурсов дорожно-строительной отрасли Российской Федерации является разработка, промышленное освоение и практическое применение серосодержащих строительных материалов. При этом речь идет не об использовании серы как балласта – в виде песка или грунта, а о материалах в которых сера, как основополагающий компонент обеспечивает высокий технический эффект – гидрофобность, сравнительно высокие прочность, морозостойкость, долговечность, присущие таким известным материалам как серный бетон, сероасфальтобетон и др.

Высокое качество изделий, простота технологии получения, а также низкая стоимость расходуемых материалов позволяют серным материалам быть конкурентоспособными по отношению к строительным материалам на традиционных вяжущих веществах.

Перспективным направлением применения серы является пропитка ее расплавом слабых, малопрочных материалов, имеющих капиллярно-пористую структуру, с целью их гидрофобизации и упрочнения. В практике уже известны способы пропитки серой изделий из цементобетона, керамических материалов, деревянных и железобетонных конструкций. В результате такой обработки в разы увеличиваются прочностные характеристики, снижается водопоглощение. Материал приобретает высокую коррозионную стойкость к растворам солей и кислот [1-4]. Однако в данных направлениях сама пропитка и последующее укрепление не реализованы как способ получения новых эффективных материалов, они имеют лишь узкую направленность, выраженную в повышении долговечности уже широко известных и применяемых материалов и изделий. А для обеспечения требуемого экономического эффекта в рассматриваемый способ должны вовлекаться местные материалы, слабые, не кондиционные, или побочные продукты, не нашедшие широкого применения, ввиду их не соответствия нормативным требованиям, но имеющие при этом крупнотоннажный потенциал, а также обладающие структурой, поверхностными свойствами, составом, располагающими к проявлению высокого синергетического эффекта при объединении с серой.

Так в Европейской части Российской Федерации и в частности на территории Республики Татарстан мало карьеров прочных минеральных пород – источников получения высокомарочного щебня, одного из основных материалов дорожного строительства. Щебень, производимый из них соответствует в основном маркам 200-400, реже 400-600, и не находит широко применения вследствие его низкой долговечности. Более прочный щебень, поставляется из других регионов. При этом потребность дорожно-строительной отрасли в щебне, например Республики Татарстан, составляет около 4 млн. м<sup>3</sup> в год.

Существуют способы укрепления щебня из осадочных пород растворами лигносульфонатов пропитки битумами для придания гидрофобности и водостойкости.

Перспективным промышленным способом укрепления щебня из слабых пород является его пропитка расплавом серы с последующей его кристаллизацией в порах и образованием плотного слоя на поверхности зерна, толщиной 3-5 мм, обеспечивающего основной эффект упрочнения. Для его реализации есть следующие предпосылки.

Сера обладает рядом располагающих свойств: низкой температурой плавления 112,8-119,3°C, и вязкостью расплава ( $6,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с). В твердом, кристаллическом виде обладает достаточной механической прочностью, гидрофобностью, водостойкостью. Расплав серы способен глубоко проникать в капилляры материалов, и в процессе кристаллизации, при охлаждении, прочно соединяться с матрицей, образуя материал с взаимопроникающей структурой. В России ежегодно производится порядка 7 млн. тонн технической серы, образующейся в результате нефте- и газоочистки, с ежегодным приростом в среднем на 0,2 млн. тонн. Подавляющий объем выпуска такой «попутной» серы приходится на газовую промышленность. В Республике Татарстан основными «носителями» серы являются высокосернистые нефти. Так после запуска ОАО «ТАНЕКО» (г. Нижнекамск) (в 2012 году началось пробное опробование) ежегодный объем производства серы составляет около 300 тыс. т серы. Кроме того в республике имеются ресурсы газовой серы, получаемой в процессе газоочистки на предприятиях «Татнефтегазпереработка» и ОАО «Татнефть».

Кроме того, на территории Республики Татарстан имеется 340 месторождений карбонатных пород с общим запасом более 400 млн. тыс. м<sup>3</sup>, в том числе для производства малопрочного щебня пригодно – 180 млн. тыс. м<sup>3</sup>.

Учитывая вышеизложенное, мы полагаем, что разработка новых строительных материалов, на основе малопрочного щебня осадочных пород и серы является перспективной. В этой связи в работе рассматривается два направления исследований. Первое – получение высокопрочного щебня, второе – получение материалов на его основе, в составе которых традиционно применяются щебни из прочных горных пород. Таковыми являются дорожные асфальтобетоны. Во втором случае предполагается совместить две технические задачи – пропитку щебня и производство асфальтобетонной смеси в одном производственном цикле.

В качестве объекта исследований рассматривался щебень из осадочных пород Альдермышского месторождения Республики Татарстан. Его характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Технические характеристики щебня Альдермышского месторождения РТ фракции 5-20 мм**

№	Наименование характеристик	Численные показатели
1	Марка по дробимости	300
2	Морозостойкость, циклов не менее	25
3	Марка по истираемости	ИЗ
4	Водопоглощение, %	2,0-7,5
5	Пористость, %	9,5-27,5

Согласно требованиям действующего СП 34.13330.2012 и дорожно-строительной классификации, такой данный щебень не пригоден для целей дорожного строительства, в том числе строительства дорог низших IV и V технических категорий.

Для изучения эффективности пропитки щебня расплавом серы исследовались фракции 5-10, 10-20 и 40-70 мм. В ходе эксперимента предварительно нагретый до

рабочей температуры 155 °С щебень совмещался с расплавом серы. Далее по завершении процессов охлаждения и кристаллизации серы производилось исследование структуры и определение физико-механических показателей свойств укрепленного щебня.

Рентгенографические исследования показали что сера, находящаяся в порах и капиллярах зерен щебня имеет кристаллическую структуру и соответствует аллотропной ромбической  $\alpha$ -(альфа) модификации серы.

Данные, представленные на кинетических зависимостях, отражают высокую эффективность укрепления щебня серой, выраженную в сравнительно высоких показателях марки по дробимости, достигающей значения марки 1200 (рис. 1). Основной особенностью пропитки известнякового щебня серой является физический процесс лиофильно-лиофобного взаимодействия компонентов. Леофильная поверхность известняка впитывает лиофобный расплав серы, имеющий низкий краевой угол смачивания и обеспечивающий высокую адгезию между ними. Это свойство «средства» известняка и расплава серы объясняет высокие прочностные показатели пропитанных образцов.

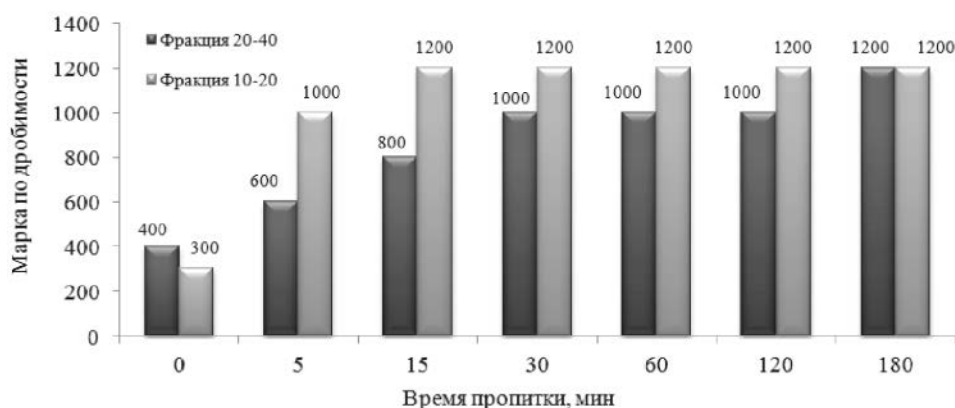


Рис. 1. Кинетическая зависимость марки по дробимости укрепленного щебня

Образующийся в результате пропитки известнякового щебня расплавом серы градиентный приповерхностный слой с более плотной структурой препятствует проникновению воды в поровое пространство срединного «ядра» и обеспечивает его надежное капсулирование. При этом показатель водопоглощения пропитанного щебня монотонно убывает в зависимости от времени пропитки.

Показатель истираемости обработанного щебня снижается в среднем на 18,5 % и соответствует марке И1, марка по морозостойкости – F300.

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено основное требование к исходному сырью. Оно таково, что поверхность зерен щебня должна быть чистой. Нежелательно наличие глинистых частиц в структуре. Гидрофильная глина, пропитанная серой склонна к набуханию в водной среде, что снижает эффект упрочнения в среднем на 30 %. Анализируя полученные результаты, мы полагаем, что полученный укрепленный щебень может применяться в дорожном строительстве в качестве материала для устройства оснований автомобильных дорог, подстилающих дренажных слоев, покрытий переходного типа, а также в качестве крупного заполнителя в составе асфальтобетонных смесей.

В практике дорожного строительства известно применение серосодержащих асфальтобетонных смесей, производимых на основе вяжущего серобитума – материала, включающего 20...40 масс. % серы. В наших исследованиях установлено, что введение серы в битум способствует некоторому повышению прочности и теплостойкости вяжущих и асфальтобетонов на их основе, что, безусловно, позволяет сократить расход битума. Вместе с тем, сера ограниченно совмещается с битумом и поэтому при охлаждении совместного расплава выделяется в отдельную фазу, играя роль дисперсного наполнителя, снижающего его пластичность, что отражается на уменьшении показателя растяжимости в 7...8 раз, повышении температуры хрупкости в среднем в 2 раза, снижении способности вяжущего к деформациям. Структура серобитума в отвержденном

состоянии является наполненной двухфазной системой, а введение наполнителей в битум и полимеры уменьшает скорость развития деформаций в теле материала в тем большей степени, чем выше его содержание [5-9].

Мы полагаем, что применение щебня укрепленного серой в составе асфальтобетонной смеси позволит сохранить реологические свойства битума, обеспечить высокую когезионную прочность в структуре материала, получить новые эффективные составы серосодержащих асфальтобетонов.

Так как сера является гидрофобным материалом, важным является определение степени адгезии битума к поверхности обработанного щебня. Известно, что щебень из осадочных горных пород имеет пористую развитую текстуру поверхности, в результате чего и обладает хорошими адгезионными свойствами с битумом. Для установления закономерности изменения свойств сцепления битума с обработанным щебнем, были изготовлены несколько составов его образцов: щебня необработанного серой, щебня, обработанного серой, с погружением в расплав битума после обработки, щебня обработанного серой, с погружением в битум после охлаждения при нормальных условиях, щебня, обработанный серой и мелким кварцевым песком и щебня осадочного происхождения, обработанного серой и активированным минеральным порошком.

Как показали результаты экспериментов, проведенных в соответствии с методикой ГОСТ 11508-74, обработка поверхности частиц щебня серой не оказывает отрицательного воздействия на степень его сцепления с битумом.

С применением методов математического планирования эксперимента была разработана матрица, учитывающая два переменных критерия: содержание вяжущего и массовое соотношение щебня фракций 5-10, 10-20 мм в составе минеральной части асфальтобетонной смеси.

Одним из наиболее применяемых типов асфальтобетонов в Республике Татарстан является горячий мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б марки I и II производимый по ГОСТ 9128-2013. При этом требования к свойствам крупного заполнителя в составе таких асфальтобетонов таковы, что минимальное значение марки щебня по дробимости должно быть не менее М 1000. Щебень, обработанный серой соответствует данной марке.

На основе полученных рецептур были приготовлены составы асфальтобетонов типа Б, марки II и исследованы их свойства. Количество вводимой в смесь щебня серы варьировалось в пределах 10...30 масс. %. Анализ физико-механических показателей свойств полученных асфальтобетонов показал, что они находятся на сравнительно высоком уровне и превышают минимальные требования ГОСТ 9128-2013. Так пределы прочности при сжатии при 20<sup>0</sup> и 50<sup>0</sup>С выше нормативных требований в 1,5...2 раза и составили 3,5...5,5 и 1,3...2,0 МПа соответственно (рис. 2).

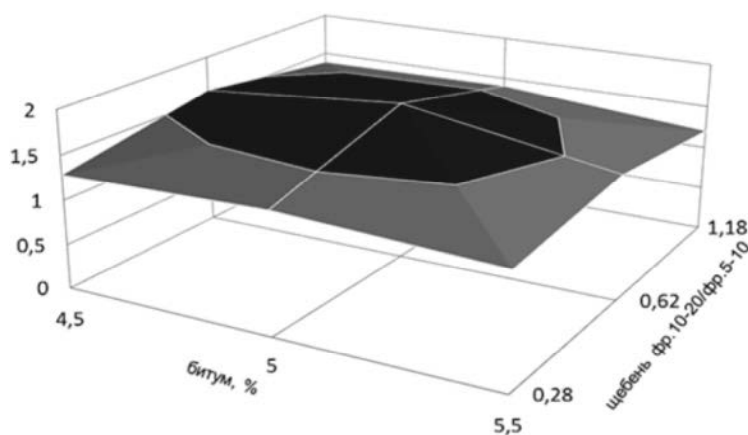


Рис. 2. Концентрационная зависимость прочности асфальтобетонов

Водонасыщение, в сравнении с асфальтобетоном на основе исходного необработанного щебня, снизилось в 4, 5 раза (рис. 3).

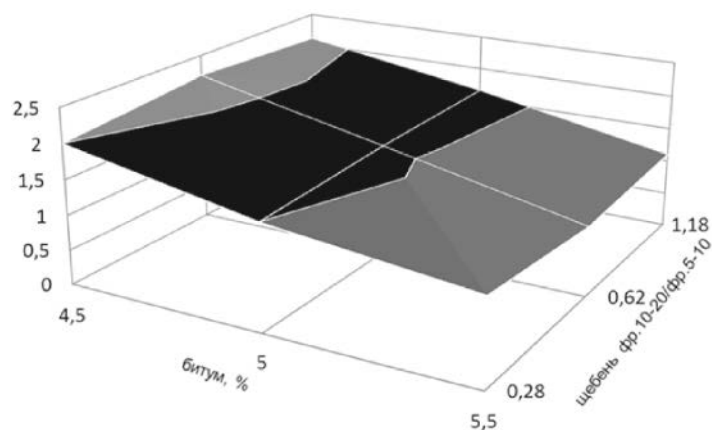


Рис. 3. Концентрационная зависимость водонасыщения асфальтобетонов

Количество циклов нагружения, при испытании на усталостную прочность, в сравнении, с асфальтобетоном на гранитном заполнителе возрастало в 2 раза (табл. 2), что косвенно свидетельствует о сохранности физико-механических показателей свойств асфальтобетона в процессе его эксплуатации и повышении его долговечности. Численное значение показателя усталостной прочности, равное 9 циклам свойственно полимерасфальтобетонам, характеризующимся как наиболее стойким к воздействию транспортных нагрузок и внешней среды, имеющим сравнительно широкий температурно-деформационный интервал работоспособности [10, 11]. Установлено, что оптимальное содержание укрепленного щебня фракций 5-10 мм в составе асфальтобетонной смеси составляет 16 масс. %, и 26 масс. % фракции 10-20 мм соответственно.

Таблица 2

#### Сравнительные показатели физико-механических свойств асфальтобетонов

Состав асфальтобетона	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	Усталостная прочность, цикл.	Предел прочности при сжатии, МПа				$K_B$
				$R_0$	$R_{20}$	$R_{20}^B$	$R_{50}$	
АБ на основе осадочного щебня	2,34	9,01	3	7,80	2,10	1,60	0,85	0,76
АБ на основе осадочного щебня, укрепленного серой	2,37	2,00	9	8,90	3,68	3,60	1,40	0,98
АБ на основе гранитного щебня	2,53	1,70	5	8,50	3,66	3,54	1,20	0,97
Требования ГОСТ 9128 -2013	-	1,5-4,0	-	<12,0	>2,2	-	>1,0	>0,85

Целью дальнейших исследований является изучение истираемости щебня обработанного серой по методике Микро-Дюваль, долговечности асфальтобетонов новых составов с применением современных методов оценки процессов колееобразования, морозостойкости, стойкости к воздействию истирающих нагрузок в результате воздействия шипованных шин на покрытие, химической стойкости к средам, образованным противогололевыми материалами, применяемыми в период зимнего содержания автомобильных дорог.

#### Список библиографических ссылок

1. Токтибаева Х. Р., Бежигитова К. А., Джаппарова М. Т., Сатывалдиев А. С., Имангалиев Т. А., Серкебаев М. К. Получение серного бетона из комовой серы – отхода добычи углеводородного сырья // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (16). С. 352–353.
2. Михеева М. В., Черезова Е. Н., Фомин А. Ю. Использование серы и отходов нефтехимической промышленности в качестве вяжущего : сб. ст. Международной

- научно-технической V WEB-конференции «Композиционные материалы» / Киев, 2010. С. 321–326.
3. Михеева М. В. Черезова Е. Н., Хозин В. Г., Фомин А. Ю. Вяжущее для бетонов на основе сополимеров серы и нефтеполимерной смолы // Строительные материалы. 2010. № 5. С. 54–56.
  4. Усов Б. А., Волгушев А. Н. Технология модифицированных серных бетонов. М. : МГОУ, 2010. 321 с.
  5. Dah-yinn L. Modificatoin of asphalt and asphalt paving mixtures by sulfur additives Dah-yinn // Ind. And. Eng. Chem. Proc. Res and Develop. 1975. № 3. P. 171–177.
  6. Sulfur may be enrout to partially replacing asphalt in highway pavements // Chem. long. 1977. № 15. Part 1. 52 p.
  7. Sulfurasphalt pavement improved with silicones // Highway and Hauvy Constr. 1978. № 2. P. 104–106.
  8. Галдина В. Д. Серобитумные вяжущие: монография. Омск : СибАДИ, 2011. 124 с.
  9. Способ получения серобитумного вяжущего: пат. 2159218 Рос. Федерация. № 2000102780/03; заявл. 03.02.2000; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. 3 с.
  10. Хафизов Э. Р., Семенов Д. Ю. Повышение качества дорожных покрытий путем введения в щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь добавок резиновой крошки // Известия КГАСУ, 2017, № 2 (40). С. 305–311.
  11. Хафизов Э. Р., Фомин А. Ю. Применение полимерасфальтобетонных покрытий на автомобильных дорогах Республики Татарстан // Известия КГАСУ, 2015, № 4 (34). С. 312–316.

**Fomin A.Yu.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [fomin-al.78@mail.ru](mailto:fomin-al.78@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Asphaltic concrete for road works based on low-quality crushed stone, reinforced with sulfur**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of the work is the development of effective road asphalt based on crushed stone from low-strength unclaimed mineral rocks of sedimentary origin.

*Results.* Based on low-quality crushed stone from sedimentary rocks, a high-strength construction crushed stone of grade M1000-1200 was obtained, by its surface treatment with a melt of sulfur. It is established that crushed stone has a number of positive properties: hydrophobicity, a relatively high brand of crushing and frost resistance, low water absorption. As a result of the interaction of the asphalt binder with the surface of the gravel particles, a gradient layer is formed at the interface, which increases the cohesive strength of the asphalt concrete structure. It is established that asphalt concrete on the basis of reinforced rubble meets the requirements of GOST.

*Conclusions.* The organization of industrial production of crushed stone treated with sulfur and asphalt concretes on its basis would allow reducing the amount of direct costs for the purchase of high-strength crushed stone and from igneous rocks and its transportation, reduce the estimated cost of construction and repair of highways.

**Keywords:** asphaltic concrete, binder, sulfur, crushed stone, reinforcement, structure.

#### **References**

1. Toktibaeva H. R., Bekzhigitova K. A., Dzhapparova M. T., Satyvaldiev A. S., Imangaliev T. A., Serkebaev M. K. Obtaining sulfuric concrete from sulfuric sulfur-waste of hydrocarbon raw materials extraction // Fundamental research. 2015. № 2 (16). P. 352–353.

2. Mikheeva M. V., Cherezova E. N., Fomin A. Yu. The use of sulfur and waste petrochemical industry as a binder: Sat. Art. V WEB-conference «Composite Materials» / International Scientific and Technical. Kiev, 2010. P. 321–326.
3. Mikheeva M. V. Cherezova E. N., Khozin V. G., Fomin A. Yu. The binder for concretes based on copolymers of sulfur and petroleum resin // Building materials. 2010. № 5. P. 54–56.
4. Usov B. A., Volgushev A. N. Technology of modified sulfur concretes. M. : MGOU, 2010. 321 p.
5. Dah-yinn L. Modificatoin of asphalt and asphalt pawing mixtures by sulfur additives. Dah-yinn // Ind. And. Eng. Chem. Proc. Res and Develop. 1975. № 3. P. 171–177.
6. Sulfur may be enrout to partially replacing asphalt in highway pavements // Chem. long. 1977. № 15. Part 1. 52 p.
7. Sulfurasphalt pavement improved with silicones // Highway and Hauvy Constr. 1978. № 2. P. 104–106.
8. Galdina V. D. Serobitum binders: monograph. Omsk : SibADI, 2011. 124 p.
9. A method for producing a sulfur bituminous binder: Pat. 2159218 Rus. Federation. № 2000102780/03; claimed. 03.02.2000; publ. 20.11.2010, Bul. № 32. 3 p.
10. Khafizov E. R., Semenov D. Yu. Improving the quality of road surfaces by adding rubber crumb additives to the crushed-mastic asphalt-concrete mixture // Izvestiya KGASU, 2017, № 2 (40). P. 305–311.
11. Hafizov E. R., Fomin A. Yu. Application of polymer-concrete coatings on highways of the Republic of Tatarstan // Izvestiya KGASU, 2015, № 4 (34). P. 312–316.



УДК 691.327:666.97

**Хаматова А.Р.** – аспирант

E-mail: [alsukhamatova@yandex.ru](mailto:alsukhamatova@yandex.ru)

**Яковлев Г.И.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [gyakov@istu.ru](mailto:gyakov@istu.ru)

**Грахов В.П.** – доктор экономических наук, профессор

E-mail: [rector@istu.ru](mailto:rector@istu.ru)

**Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова**

Адрес организации: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

**Хохряков О.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [olvik@list.ru](mailto:olvik@list.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Механоактивация быстротвердеющих композиций на основе электросталеплавильного шлака<sup>1</sup>**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью данного исследования является изучение физико-технических и физико-механических свойств быстротвердеющих композиций на основе тонкомолотого электросталеплавильного шлака (ЭСШ) производства ПАО «Ижсталь» (г. Ижевск, Россия) до и после их механоактивации.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что механоактивация быстротвердеющей композиции позволяет сократить сроки схватывания в 2 раза, увеличить при этом прочность на 20 % в сравнении с композициями, которые не были подвержены кратковременному совместному помолу входящих в их состав компонентов.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной индустрии состоит в том, что получен эффективный способ изготовления быстротвердеющих композиций, который позволяет удовлетворить условия быстрого схватывания и твердения растворной смеси. Он заключается в кратковременном совместном помолу всех компонентов. Также помол положительно влияет на набор прочности быстротвердеющих композиций при одновременном снижении в их составе гипса до 5 %.

**Ключевые слова:** электросталеплавильный шлак, быстротвердеющие композиции, сухая строительная смесь, механоактивация, утилизация шлака, ускорители твердения.

Аварийные и ремонтные работы, связанные с быстрой ликвидацией напорных течей в гидротехнических сооружениях и конструкциях, выполненных из бетона, кирпича, натурального камня требуют применения особых строительных растворов, которые отличаются ускоренным схватыванием и твердением. Растворы такого рода получают путем затворения водой быстротвердеющих композиций. Эффект ускоренного схватывания и твердения такого раствора достигается, в том числе, благодаря предварительной механоактивации [1, 2] входящих в состав специальных быстротвердеющих сухих смесей минеральных компонентов.

Механоактивация совершается путем совместного кратковременного помолу сухих компонентов смесей. Основными физико-химическими процессами при этом являются:

- появление дополнительных центров кристаллизации при затворении полученной композиции водой;
- повышение поверхностной энергии мелкодисперсных частиц и реализация этой энергии в реакциях гидратации;
- более полная кристаллизация цементного вяжущего.

Другими словами, увеличение удельной поверхности компонентов, их реакционной способности (активности) оказывает значительное влияние на формирование структуры раствора, скорость твердения и его прочностные характеристики [3]. Использование

<sup>1</sup> Данное исследование проведено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям).

активированного портландцемента в качестве основного вяжущего обеспечивает формирование более плотной и однородной структуры раствора, что позволяет получить резкий прирост однодневной прочности и увеличение ее по истечении 28 суток твердения. Эффект механоактивации компонентов сухих смесей заключается в переходе неактивной поверхности как вяжущих, так и инертных материалов к химически активному состоянию, которое выражается в повышенной способности к реакциям в ходе последующих технологических операций.

В работах [4-6] изучен еще один фактор, улучшающий структуру бетона – влияние микронаполнителей на дифференциальную пористость твердеющего цементного камня и, следовательно, на его прочность. Авторами показано, что введение мелкодисперсного наполнителя обуславливает снижение размеров и сокращение количества крупных капиллярных пор при равном В/Т.

В настоящем исследовании в роли микронаполнителя выступает электросталеплавильный шлак ПАО «Ижсталь», который, перед введением в качестве компонента в быстротвердеющую систему, был подвергнут помолу. Необходимость проведения данной операции обоснована в уже проведенных исследованиях, посвященных изучению свойств ЭСШ и его влиянию на цементные системы [7, 8]. Кроме того, предложен способ утилизации крупнотоннажного отхода черной металлургии, что позволяет решить проблему возрастающей экологической нагрузки вблизи населенных пунктов [9-11], связанную с выплавкой стали в электродуговых печах.

### Материалы

Объектом данного исследования служат сухие строительные смеси, которые были изготовлены, опираясь на принципы механоактивации, путем совместного помола в лабораторной пружинной мельнице следующих компонентов:

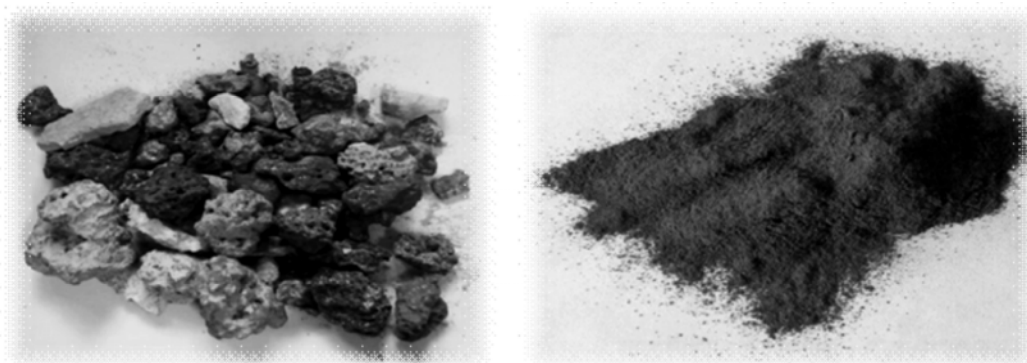
- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б производства ОАО «Мордовцемент» (Холдинг «ЕВРОЦЕМЕНТ групп»);
- гипс строительный нормальноотвердеющий Г5, Г6 производства Аракчинского гипсового завода (г. Казань);
- электросталеплавильный шлак производства ПАО «Ижсталь» (г. Ижевск).

Исследуемый ЭСШ был получен нами после первичной обработки (был подвержен дроблению, магнитной сепарации, разделению на фракции). ЭСШ был отнесен к фракции 0-20 мм. Имел темно-серый цвет. Помимо пылеватой части присутствуют крупные включения (рис. 1 а). Обладал магнитными свойствами. Перед исследованием и применением в качестве компонента быстротвердеющих смесей ЭСШ подвергался сушке в течение 24 часов, последующему дроблению на щековой дробилке с просеиванием через сито № 0,315 (рис. 1 б) и дополнительному помолу на вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3 (ООО «Опытный завод со специальным бюро» (г. Москва), мощность двигателя 3 кВт, объем помольной камеры 10 л). В ходе помола до удельной поверхности 6838 см<sup>2</sup>/г был определен коэффициент размолоспособности шлака (1,96 м<sup>2</sup>/с). Характеристики ЭСШ приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристика ЭСШ

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Истинная плотность	кг/м <sup>3</sup>	3060
2	Насыпная плотность: - до дробления; - после дробления	кг/м <sup>3</sup>	1335
			1490
3	Пустотность	%	11
4	Удельная поверхность: - до помола; - после помола (в течение 8 мин)	см <sup>2</sup> /г	2153
			6838
5	Коэффициент размолоспособности	м <sup>2</sup> /с	1,96
6	pH 10 %-го раствора водной вытяжки	-	11,2
7	Гидравлическая активность по прочности (28 сут)	МПа	2,92



а) ЭСШ до дробления

б) ЭСШ после дробления и просеивания

Рис. 1. Электросталеплавильный шлак ПАО «Ижсталь»

По активности шлаки подразделяют на группы в соответствии с ГОСТ 3344-83\* «Щебень и песок, шлаковые для дорожного строительства. Технические условия». Исследуемый ЭСШ относится к активным шлакам, так как его гидравлическая активность по прочности на 28 суток твердения составляет 2,92 МПа.

Также был проведен количественный химический анализ с целью определения входящих в состав шлака оксидов. Результат химического анализа приведен в табл. 2.

Таблица 2

#### Химический состав электросталеплавильного шлака

Содержание оксидов в % на абсолютно сухую навеску												
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	п.п.п.	Сумма
18,87	0,53	7,91	14,03	2,12	42,02	7,23	0,12	0,19	0,08	0,76	5,81	99,61

Рентгенофазовый анализ (рис. 2) показал преобладание в структуре ЭСШ затвердевшего шлака кристаллических фаз при минимальном содержании стекловидных образований. Исследования минералогического состава ЭСШ позволили нам сделать вывод о присутствии в его составе таких минералов, как майенит (12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), титанит (Ca·TiO<sub>2</sub>·SiO<sub>2</sub>), однокальциевый алюминат (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), содержание которых в своем составе характерно для глиноземистых цементов. Проанализировав химический состав (таблица 2), можно сделать вывод о близости состава шлака к составу глиноземистого цемента по процентному содержанию следующих оксидов: CaO – 42,02 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14,03 %; SiO<sub>2</sub> – 18,87 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7,91 %. Поскольку глиноземистый цемент является быстротвердеющим вяжущим, нами был сделан вывод о возможности введения ЭСШ в цементную систему в качестве минеральной добавки, ускоряющей твердение. Однако количественного соотношения минералов ЭСШ недостаточно для существенного сокращения сроков схватывания, поскольку в глиноземистых цементах схватывание и набор прочности происходят за счет взаимодействия с водой низкоосновных алюминатов кальция с образованием гидроалюминатов кальция и выделению гидроксида алюминия [12]. Таким образом, в составе глиноземистого цемента Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> должен содержаться в количестве 30-50 % для обеспечения ускоренного твердения системы, в то время как в составе ЭСШ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> присутствует в количестве 7,91 %, поэтому было принято решение о создании трехкомпонентных смесей. В изготовленных смесях в роли основного вяжущего выступал портландцемент; ЭСШ вводился для регулирования сроков схватывания, а также в качестве минерального наполнителя; строительный гипс вводился для иницирования образования этtringита, который играет основную роль на начальном этапе твердения быстротвердеющих растворов.

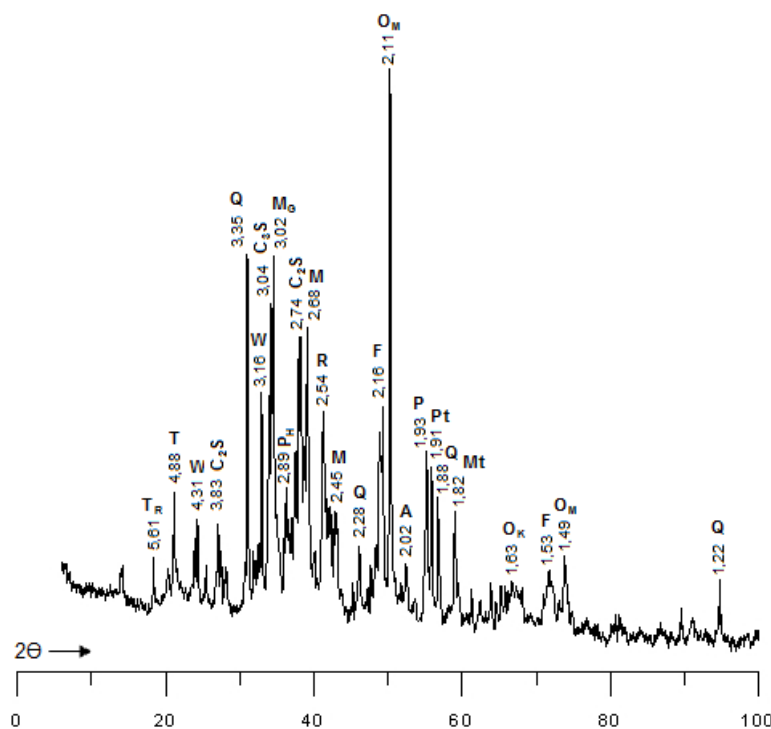


Рис. 2. Рентгенограмма ЭСШ:

- $T_R$  – тоберморит ( $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$ ); T – титанит ( $Ca \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$ );  
 W – волластонит ( $CaO \cdot SiO_2$ );  $C_2S$  – белит ( $2CaO \cdot SiO_2$ );  
 $C_3S$  – алит ( $3CaO \cdot SiO_2$ ); Q – кремнезем ( $SiO_2$ );  $M_G$  – магнетит ( $Fe_3O_4$ );  
 $P_H$  – трехкальциевый фосфат ( $3CaO \cdot P_2O_5$ ); M – майенит ( $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ );  
 $O_M$  – периклаз ( $MgO$ ); A – однокальциевый алюминат ( $CaO \cdot Al_2O_3$ );  
 Pt – пирит ( $FeS_2$ );  $O_K$  – оксид кальция ( $CaO$ ); F – вюстит ( $FeO$ );  
 P – портландит ( $Ca(OH)_2$ ); R – родонит ( $MnO \cdot SiO_2$ ); Mt – монтichelлит ( $CaO \cdot MnO \cdot SiO_2$ )

## Результаты

При традиционном перемешивании компонентов сложно судить об однородности полученной смеси, так как оценка качества смешивания обычно производится по внешним признакам. Поэтому для улучшения физико-механических свойств смеси был изменен процесс ее приготовления: после традиционного перемешивания, полученная сухая смесь подвергалась дополнительному кратковременному помолу в течение 1 минуты в пружинной лабораторной мельнице. В процессе помола, помимо механохимической активации компонентов, достигалось повышение однородности смеси. Помолу подвергались составы с соотношением компонентов цемент/ЭСШ = 70/30, как самые оптимальные по содержанию шлака, поскольку увеличение количества ЭСШ в системе прямо пропорционально падению прочности.

Сравнительные данные испытаний на прочность и определение сроков схватывания смесей, изготовленных различными способами, представлены в таблице 3.

Данные табл. 3 позволяют сделать вывод о том, что в составах, не подвергшихся механоактивации, сроки схватывания сокращаются при увеличении содержания гипса. Оптимальные результаты по срокам схватывания показывает состав смеси с содержанием гипса в количестве 15 %, однако при этом наблюдается падение 28-суточной прочности растворов при одновременном увеличении прочности в первые сутки твердения. Это объясняется тем, что гипс вынужден вступать во взаимодействие не только с портландцементом, но и с ЭСШ, результатом чего является чрезмерное образование этtringита. Этtringит, формирующийся в затвердевшем цементном камне приводит к его разрушению, что в свою очередь приводит к понижению прочности раствора.

Таблица 3

**Сравнительные характеристики свойств быстротвердеющих композиций, изготовленных путем традиционного перемешивания и путем механохимической активации**

№ п/п	Содержание минеральных компонентов, %			В/Т	Сроки схватывания		Прочность на сжатие, МПа		
	Цемент	ЭСШ	Гипс <sup>2</sup>		начало	конец	1 сут.	7 сут.	28 сут.
Композиции, изготовленные путем традиционного перемешивания									
1	70	30	–	0,29	35'00"	1ч 54'00"	6,3	55,4	79,2
2	70	30	5	0,29	3'16"	6'17"	9,4	61,8	71,0
3	70	30	10	0,29	4'15"	4'57"	14,8	34,6	65,3
4	70	30	15	0,29	4'08"	4'50"	12,6	31,3	57,0
Механоактивированные композиции									
5	70	30	–	0,30	21'00"	1ч 29'20"	7,0	58,8	81,3
6	70	30	5	0,30	2'39"	3'50"	18,9	74,8	102,5
7	70	30	10	0,30	2'10"	2'45"	20,5	51,9	73,3
8	70	30	15	0,29	2'05"	2'35"	10,8	50,8	69,3

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что помол благоприятно сказался не только на изменении сроков схватывания, но и на величину прочности, что связано со снижением содержания гипса при механоактивации быстротвердеющей композиции. Наилучшие характеристики присущи составу с содержанием гипса в количестве 5 % (прочность на 28-е сутки выше на 30 % в сравнении с прочностью состава с содержанием гипса 15 %). В тоже время схватывание этого состава протекает медленнее составов с содержанием гипса в количестве 10 и 15 %, что является положительным фактором, так как слишком быстрое схватывание не позволяет качественно сформовать образцы для испытаний или использовать полученную смесь на практике при заделке дефектов при аварийных работах.

### Заключение

По результатам проведенных исследований было установлено:

1. Электросталеплавильный шлак ПАО «Ижсталь» относится к активным шлакам, его гидравлическая активность по прочности на 28 сутки твердения составляет 2,92 МПа.
2. В смесях, которые не были подвержены механоактивации, сроки схватывания сокращаются при увеличении содержания гипса. Однако при этом наблюдается падение 28-суточной прочности растворов при одновременном увеличении прочности в первые сутки твердения.
3. Механоактивация быстротвердеющей композиции позволяет сократить сроки схватывания в 2 раза, увеличив при этом прочность на 20 % в сравнении с композициями, которые не были подвержены кратковременному совместному помолу входящих в их состав сухих компонентов.

Таким образом, наиболее эффективным способом получения быстротвердеющей композиции, удовлетворяющим условию быстрого схватывания и твердения растворной смеси, является кратковременный совместный помол всех компонентов. Также помол положительно влияет на набор прочности быстротвердеющих композиций при одновременном снижении в их составе гипса до 5 %.

### Список библиографических ссылок

1. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. № 75 (3). С. 203–216.
2. Poole J. L., Riding K. A., Juenger M. C. G., Folliard K. J., Schindler A. K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy // Journal of ASTM International. 2010. Vol. 7. № 9.

<sup>2</sup>Содержание гипса в составе сухой смеси выражено в % от суммарной массы цемента и ЭСШ.

3. Траутвайн А. И., Ядыкина В. В., Гридчин А. М. Особенности механоактивированных минеральных порошков // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 32–34.
4. Бабков В. В., Мохов В. Н., Капитонов С. М. Разрушение цементных бетонов. Уфа : ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
5. Kumar S., Vandopadhyay A., Rajinikanth V., Alex T. C., Kumar R. Improved rocessing of blended slag cement through mechanical activation // Journal of Materials Science. 2004. Vol. 39. № 10. P. 3449–3452.
6. Kumar S., Kumar R., Vandopadhyay A., Alex T. C., Ravi Kumar B., Das S. K., Mehrotra S. P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30. № 8. P. 679–685.
7. Хаматова А. Р., Хохряков О. В. Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 221–227.
8. Хаматова А. Р., Хохряков О. В. Оценка эффективности применения электросталеплавильного металлургического шлака ОАО «Ижсталь» (г. Ижевск) в качестве наполнителя для цементов низкой водопотребности : сб. ст. Теория и практика повышения эффективности строительных материалов – Материалы X Международной конференции молодых учёных / СГТУ им. Гагарина Ю.А. Пенза, 2015. С. 130–133
9. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д : Феникс, 2007. 368 с.
10. Пугин К. Г. Вопросы экологии использования твёрдых отходов чёрной металлургии в строительных материалах // Строительные материалы. 2012. № 8. С. 54–56.
11. Морозов Н. М., Степанов С. В., Галеев А. Ф. Применение промышленных отходов в цементных композициях : сб. ст. Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, общества, производства и промышленности» / НИЦ АЭТЕРНА. Самара, 2016. С. 36–39.
12. Рояк С. М., Рояк Г. С. Специальные цементы. М. : Стройиздат, 1983. 279 с.

**Khamatova A.R.** – post-graduate student

E-mail: [alsukhamatova@yandex.ru](mailto:alsukhamatova@yandex.ru)

**Yakovlev G.I.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [gyakov@istu.ru](mailto:gyakov@istu.ru)

**Grakhov V.P.** – doctor of economic sciences, professor

E-mail: [rector@istu.ru](mailto:rector@istu.ru)

**Kalashnikov Izhevsk State Technical University**

The organization address: 426069, Russia, Izhevsk, Studencheskaya st., 7

**Khohryakov O.V.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: [olvik@list.ru](mailto:olvik@list.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelyonaya st., 1

### Mechanoactivation of quick-setting compositions based on electric steelmaking slag

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of this study is to study the physico-technical and physicomechanical properties of quick-setting compositions based on fine-grained electric steel-smelting slag produced by PJSC «Izhstal» (Izhevsk, Russia) before and after their mechanoactivation.

*Results.* The main results of the study are that the mechanoactivation of the quick-setting formation allows to increase the time to 20 % in comparison with the results that were not subjected to short-term joint grinding of the constituent components.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is that it contributed to the successful introduction of compositions that allow satisfying the conditions for rapid setting and hardening of the mortar mixture. It consists in a short-term joint grinding of all components. Also, grinding positively affects the strength of fast-hardening compositions while reducing the gypsum content in them to 5 %.

**Keywords:** electric steelmaking slag, quick-setting compositions, dry building mixture, mechanoactivation, slag utilizing, cement accelerators.

### References

1. Boldyrev V. V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids // *Uspekhi khimii*. 2006. № 75 (3). P. 203–216.
2. Poole J. L., Riding K. A., Juenger M. C. G., Folliard K. J., Schindler A. K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy // *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7. № 9.
3. Trautvain A. I., Yadykina V. V., Gridchin A. M. Features of mechanical activated mineral powders // *Stroitel'nye materialy*. 2011. № 11. С. 32–34.
4. Babkov B. B., Mokhov B. H., Kapitonov S. M. The destruction of cement concrete. Ufa : SUE «Ufimskiy poligrafkombinat», 2002. 376 с.
5. Kumar S., Bandopadhyay A., Rajinikanth V., Alex T. C., Kumar R. Improved rocessing of blended slag cement through mechanical activation // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. № 10. P. 3449–3452.
6. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T. C., Ravi Kumar B., Das S. K., Mehrotra S. P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. № 8. P. 679–685.
7. Khamatova A. R., Khohryakov O. V. The cement of low water requirement based on electro-steel-smelting slag OJSC «Izhstal» // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 2 (36). P. 221–227.
8. Khamatova A. R., Khohryakov O. V. Evaluation of the effectiveness of electro-steel-smelting slag OJSC «Izhstal» (Izhevsk) as a filler for cements of low water demand : Theory and practice of increasing the effectiveness of building materials : dig. of art. of the X International conference of young scientists / SSTU after Gagarin Yu.A. Penza, 2015. P. 130–133.
9. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. Building materials from waste of industry. Rostov n/D : Feniks, 2007. 368 p.
10. Pugin K. G. Issues of ecology of use of ferrous metallurgy solid waste in building materials // *Stroitel'nye materialy*. 2012. № 8. P. 54–56.
11. Morozov N. M., Stepanov S. V., Galeyev A. F. The use of industrial waste in cement compositions : dig. of art. of the International scientific practical conference «Integration of science, society, production and industry» / SRC AERTHERA. Samara, 2016. P. 36–39.
12. Royak S. M., Royak G. S. Spetsial'nye tsementy. M. : Strojizdat, 1983. 279 p.

УДК 691.542

**Хохряков О.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [olvik@list.ru](mailto:olvik@list.ru)

**Хозин В.Г.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [khozin@kgasu.ru](mailto:khozin@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Валиева А.И.** – инженер

E-mail: [464413@mail.ru](mailto:464413@mail.ru)

**ООО «ИнТехРемонт»**

Адрес организации: 420075, Россия, г. Казань, ул. Дорожная, д. 3

### **Сухая органоминеральная добавка для устройства безусадочных промышленных полов**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В статье обосновывается эффективность применения безусадочных бетонов для устройства бесшовных промышленных полов и предлагается их использование взамен топпинговых, обладающих рядом эксплуатационных недостатков.

*Результаты.* Предложена органоминеральная добавка и изучены технологические особенности её применения для обеспечения эффекта расширения бетона. Разработан состав высокопрочного самоуплотняющегося тяжелого бетона, отличающегося повышенными эксплуатационными показателями и долговечностью.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в разработке для промышленных полов безусадочного бетона с добавкой, что может стать альтернативой современным бетонам, упрочненным топпингом.

**Ключевые слова:** линейное расширение, промышленные полы, самоуплотняющиеся и высокопрочные бетоны, топпинг.

Промышленные полы испытывают постоянное воздействие как механических, так и статических нагрузок, например, от движения автотранспорта, гидравлических складских тележек, штабелёров, веса различного технологического оборудования, а также вибраций, ударов, падений тяжёлых предметов и др. Наибольшее воздействие от указанных нагрузок испытывает верхний слой бетона. Он быстрее разрушается и теряет эстетический вид.

Это обстоятельство привело к тому, что в последние годы в строительной практике получили значительное распространение промышленные полы с верхним слоем, упрочненным топпингом – сухой цементной смесью, приготовленной на основе кварцевого или корундового заполнителя (реже металлического) [1-4]. Выбор топпинга зависит от проектной эксплуатационной нагрузки и назначения объекта. Традиционно нанесение топпинга осуществляется в два приема по правилу «сухой на мокрое». Топпинг равномерно рассыпают по поверхности бетонной смеси через несколько часов после её укладки и уплотняют в верхнем слое пола с помощью специальных затирочных машин.

Благодаря указанному способу нанесения топпинговые полы обладают увеличенным сроком службы, хорошей устойчивостью к механическим повреждениям, износу и истиранию, возможностью эксплуатации при низких температурах (до -30°C), полным отсутствием пыли, эстетической привлекательностью и др. Это позволяет устраивать топпинговые полы при строительстве новых промышленных и реконструкции существующих зданий, объектов с большим скоплением людей и др. Например, к ним относятся цеха заводов, гаражи, автозаправки, логистические центры, паркинги, складские помещения, торговые и развлекательные центры, административные здания, вокзалы.

Несмотря на указанные преимущества, топпинговые полы не лишены ряда недостатков, а именно:

- невозможность устройства бесшовного монолитного покрытия из-за высокой собственной усадки и низкой прочности на растяжение бетона на основе портландцемента;



- необходимостью выполнения трудоемкого и дорогостоящего процесса нарезки швов и укладки в них полиуретанного герметика;
- наличием температурно-усадочных швов, снижающих такие эксплуатационные свойства как ровность, водонепроницаемость и морозостойкость.
- растрескиванием верхнего высокопрочного слоя (60-80 МПа) из-за разности деформаций с бетонным основанием (30-40 МПа);
- протеканием негативного процесса, так называемой, деламинации, т.е. отслоение или отторжение верхнего слоя в виде тонких топпинговых пластин от бетонного основания (рис. 1).

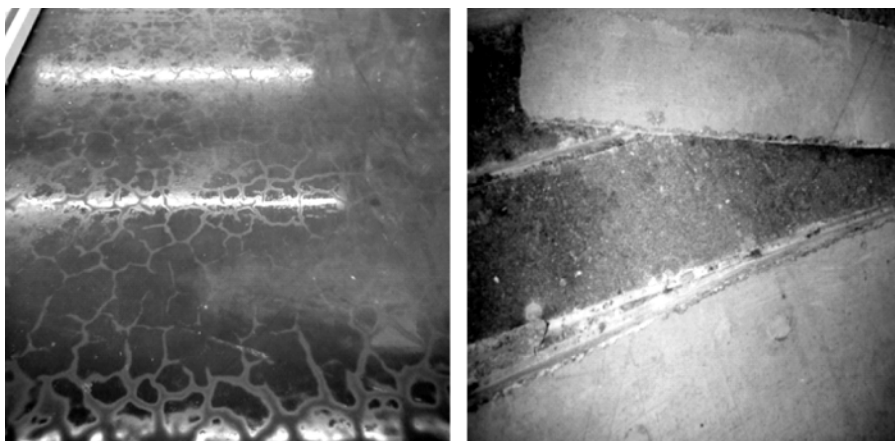


Рис. 1. Фотоснимки дефектов поверхности промышленного пола, возникших в процессе его эксплуатации (слева – поверхностная сетка трещин, справа – отслоение верхнего топпингового слоя от основного бетона)

Как ни странно, но серьезным препятствием для устройства бездефектных топпинговых полов является воздухововлечение бетонной смеси основного слоя. Оказывается, в процессе ударно-вибрационного втирания сухой топпинговой смеси пузырьки воздуха поднимаются и задерживаются в приповерхностной зоне «бетон-топпинг», ослабляя сцепление между ними и снижая эксплуатационную надежность полов.

Как правило, ремонт этих дефектов выполняется путем механической срезки верхнего топпингового слоя на глубину до 10 мм (рис. 2). После подготовки поверхности (обеспыливание, увлажнение и пр.) выполняют укладку ремонтных составов вровень с поверхностью пола. Для этого применяют ремонтные составы наливного или тиксотропного типа, которые подвергаются последующей затирке и шлифованию.



Рис. 2. Фотоснимки процесса ремонта поверхности промышленного пола с помощью тиксотропных и наливных составов

По мнению авторов, множество проблем, возникающих при устройстве топпинговых полов, может быть устранено путем устройства безусадочных промышленных полов, поскольку при их укладке отпадает необходимость использования топпингов. Полы устраиваются по традиционной технологии монолитного бетона с использованием неспециальных подручных инструментов. Устройство температурно-усадочных швов может выполняться через 60-70 м, что дает существенную экономию по трудозатратам и расходным материалам (диски для нарезки, герметик и др.).

Известны безусадочные промышленные полы, уложенные с использованием эпоксидных смол, магнезиальных вяжущих и др. [5-10], однако они не нашли широкого распространения. С технико-экономической точки зрения целесообразнее оказались безусадочные бетоны, приготовленные на основе цементных вяжущих сульфоалюминатного типа. Например, еще в 60-70-х гг. прошлого века отечественные ученые разработали составы безусадочных бетонов для устройства протяженных дорожных покрытий с нечастым количеством швов. В 1990-2000-е года под руководством НИИЖБ была выполнена укладка безусадочных промышленных полов на мясомолочных комбинатах. Для этого применялась среднеподвижная бетонная смесь с маркой по подвижности ПЗ и с маркой бетона по прочности в проектном возрасте В30 (Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1974. 312 с.) [11].

Принципиально технология не нова. Кроме основных требований, предъявляемых к технологии устройства традиционных промышленных полов, добавляются следующие условия для обеспечения их безусадочности:

- устройство жесткого и ровного подстилающего слоя (асфальтобетонная стяжка, уплотненное песчано-щебеночное основание и пр.), не затрудняющего развитие деформаций расширения;

- укладка полиэтиленовой пленки между подстилающим слоем и основным бетоном, обеспечивающей его скольжение в процессе расширения;

- обильное увлажнение уложенного бетона для создания эффекта расширения.

Несмотря на указанный опыт устройства бесшовных полов, сегодня требования к технологии укладки и свойствам бетона ужесточаются. Например, ставится задача по упрощению монолитных работ путем применения самоуплотняющихся бетонных смесей, которые легко и нетрудоемко укладываются и разравниваются на больших площадях. С другой стороны, предъявляются повышенные требования к эксплуатационно-техническим показателям, таким как прочность бетона на сжатие, прочность бетона на растяжение при изгибе, ударная прочность, истираемость и др.

По нашему мнению, в условиях строительной площадки, особенно ее удаленности от поставщика бетона, соблюдение технологии и качества устройства безусадочных полов возможно лишь с использованием сухой органоминеральной добавки, которую мы разработали на кафедре технологии строительных материалов, изделий и конструкций КГАСУ. Для применения она засыпается в миксер со свежедоставленной на объект малоподвижной бетонной смесью (марка П1) в количестве от 10 до 15 % от массы цемента (или 2,5 % от массы бетона). Это исключает проблемы, которые могут возникнуть в процессе приготовления бетонной смеси и при её транспортировке. После перемешивания в течение не менее 10 минут модифицированная бетонная смесь подается тем или иным способом к месту укладки.

Важной технологической особенностью является определение момента обильного увлажнения уложенного бетона с добавкой, при котором обеспечивается наибольший эффект расширения. Дело в том, что этот эффект существенно зависит от прочности бетона, при которой его структура наиболее податлива к деформациям. Очевидно, что при значительном упрочнении бетона, он не сможет расширяться, а при низкой прочности, усилие расширения отрелаксирует в объеме бетонной смеси и эффект не проявится.

Эта особенность видна из рис. 3, на котором показана зависимость линейного расширения образцов бетона с добавкой от времени его погружения в воду.

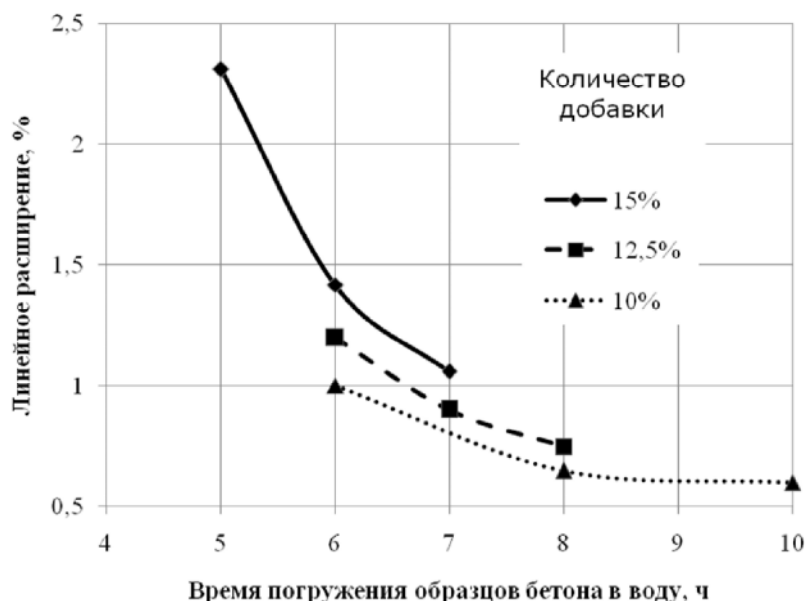


Рис. 3. Зависимость линейного расширения бетона с добавкой от времени его погружения в воду

Из рис. 3 видно, что чем позже были погружены образцы бетона в воду, тем ниже уровень линейного расширения. Например, при содержании добавки 10 % расширение образцов, погруженных, соответственно, через 6 и 10 часов после изготовления снижается в 1,7 раза. На основании этих результатов было установлено, что стабильное расширение бетона с добавкой без ухудшения его физико-механических свойств обеспечивается при погружении образцов в возрасте 6-8 часов. Это, кстати, соответствует моменту, когда, человек, встав на бетонное покрытие, оставляет на нем неглубокий след. Обычно этот момент является сигналом для начала работ по укладке и затирке топпинга при устройстве традиционных промышленных полов.

С помощью конического пластометра была определена прочность вяжущего с добавкой, которая необходима для равномерного протекания эффекта расширения бетона (рис. 4). Из рис. 4, с учетом данных рис. 3, видно, что её значение ориентировочно составляет 2-3 МПа. Прямые испытания тяжелого бетона с добавкой на сжатие в возрасте 6-8 часов показали, что его прочность варьирует в интервале 0,2-0,3 МПа.

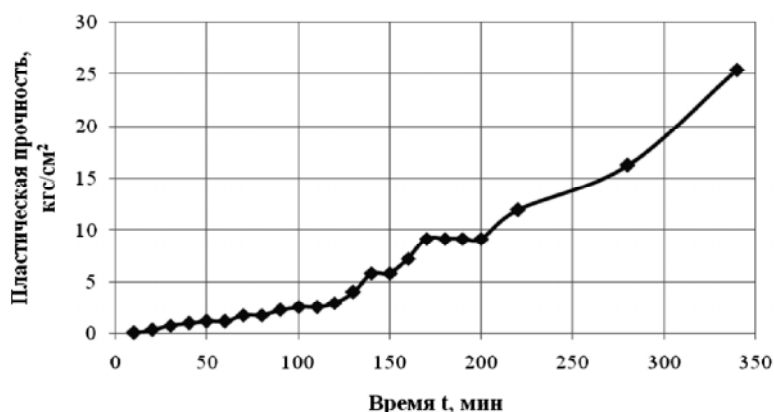


Рис. 4. Кинетика набора пластической прочности расширяющегося вяжущего с добавкой

В результате с учетом указанных технологических особенностей, оптимизации рецептуры и количества добавки (12,5 %) нами был получен состав тяжелого бетона с повышенными эксплуатационно-техническими характеристиками (табл.).

Разработанный тяжелый бетон относится к самоуплотняющимся (марка P5) и обладает высокой прочностью на сжатие (класс B55) и на растяжение при изгибе (класс B<sub>ф</sub>

4,8), что соответствует уровню прочности аэродромных покрытий. По показателям морозостойкости (F300) и водонепроницаемости (W12) он отвечает требованиям долговечности и несущей способности. Следует отметить, что этими показателями будет обладать бетон на всю толщину пола, а не только в верхнем слое, как у топпинговых полов. Тем не менее, несмотря на положительные результаты работы, остаются нерешенными вопросы проектирования промышленных полов на основе разработанного бетона и определения размера бесшовной карты с учетом величины линейного расширения.

Таблица

**Состав и свойства тяжелого бетона для безусадочных промышленных полов**

Состав тяжелого бетона на 1 м <sup>3</sup>		Свойства тяжелого бетона					
Наименование материала	Расход материалов, кг	Подвижность, см	Линейное расширение, %	Прочность, МПа, на		Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости
				сжатие	Растяжение при изгибе		
портландцемент ЦЕМ I 42,5Б	480	56-62 (марка P5)	0,5-0,7	72 (класс B55)	6,5 (класс B <sub>тв</sub> 4,8)	F <sub>2</sub> 300	W12
щебень (фр. 5-20 мм)	1000						
песок обогащенный (M <sub>к</sub> =2,5)	750						
добавка	60						
вода	185						

Итак, судя по полученным данным, полы из высокопрочного самоуплотняющегося бетона с эффектом расширения будут обладать повышенной эксплуатационной надежностью и долговечностью, что исключит проявление таких негативных дефектов как деламинация, растрескивание поверхностного слоя и пр. Эти показатели позволяют рекомендовать бетон с добавкой для широкого применения в качестве альтернативы топпинговым полам.

### Список библиографических ссылок

1. Захаров С. А. Бетонные полы для промышленного и коммерческого применения // Бетоны и сухие смеси. 2008. № 5/Б (71). С. 12–13.
2. Медведева И. Н., Богоявленская И. Н. Сухие строительные смеси для устройства полов: составы, свойства, сравнительные испытания // Бетоны и сухие смеси. 2008. № 5/Б (71). С. 43–45.
3. Гончарова М. А., Каширская О. А., Ивашкин А. Н., Комаричев А. В. Современные способы устройства высококачественных декоративных бетонных полов : сб. трудов конференции Научно-технологические Технологии и Инновации – Юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В. Г. Шухова / БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2014. С. 117–121.
4. Капитанов А. А. Топпинг: рецепты качественного пола // Экспозиция. 2008. № 71. С. 49–50.
5. Литвинова Ю. А. Применимость наливных полимерных полов в помещениях промышленных предприятий : сб. трудов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова / БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 1804–1806.

6. Гусев Н. И., Скачков Ю. П., Кочеткова М. В. Наливные полы в помещениях различного назначения // Сухие строительные смеси. 2015. № 2. С. 13–16.
7. Hofer, Roloff Primed and charged with bridging the cracks over industrial floors // Paint & Ink International. 1999. № 6. С. 8–10.
8. Головнев С. Г., Киянец А. В., Горбаненко В. М. Преимущества применения магниезальных стяжек // Жилищное строительство. 2004. № 7. С. 27–28.
9. Exchory floor topping resists acid // Products Finishing. 1996. № 2. С. 109.
10. Морозов Н. М., Красникова Н. М., Боровских И. В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 7 (59). С. 30–38.
11. Звездов А. И., Титов М. Ю. Бетон с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности // Бетон и железобетон. 2001. № 4. С. 17–20.

**Khokhryakov O.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [olvik@list.ru](mailto:olvik@list.ru)

**Khozin V.G.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [khozin@kgasu.ru](mailto:khozin@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Valieva A.I.** – engineer

E-mail: [464413@mail.ru](mailto:464413@mail.ru)

**LTD «InTehRemont»**

The organization address: 420075, Russia, Kazan, Dorozhnaya st., 3

### **Dry organic mineral mix for the production of non-shrinking industrial floors**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The article substantiates the effectiveness of the use of non-shrinkage concrete for the production of seamless industrial floors and suggests their use instead of topping which have operational disadvantages.

*Results.* We proposed an organic mineral additive that provides the effect of expanding concrete and we studied the technological features of the application of the additive. The composition of high-strength self-compacting heavy concrete is developed, characterized by increased performance and durability.

*Conclusions.* Significance for the construction industry is to develop non-shrinkage concrete with additives for industrial floors, which can become an alternative to modern concrete hardened by topping.

**Keywords:** linear expansion, industrial floors, self-sealing and high-strength concretes, topping.

#### **References**

1. Zakharov S. A. Concrete floors for industrial and commercial use // Betony i sukhiye smesi. 2008. № 5/B (71). P. 12–13.
2. Medvedeva I. N. Bogoyavlenskaya I. N. Dry construction mixtures for flooring: compositions, properties, comparative tests // Betony i sukhiye smesi. 2008. № 5/B (71). P. 43–45.
3. Goncharova M. A., Kashirskaya O. A., Ivashkin A. N., Komarichev A. V. Modern ways of the device of high-quality decorative concrete floors : dig. of art. of the conference High Tech and Innovation – Jubilee International scientific and practical conference,

- dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of the BSTU V. G. Shukhova / BGTU im. V.G. Shukhova. Belgorod, 2014. P. 117–121.
4. Captain A. A. Topping: recipes of qualitative sex // *Ekspozitsiya*. 2008. № 71. P. 49–50.
  5. Litvinova Yu. A. Applicability of liquid polymer floors in the premises of industrial enterprises : dig. of art. of the international scientific and technical conference of young scientists BSTU V. G. Shukhova / BGTU im. V. G. Shukhova. Belgorod, 2015. P. 1804–1806.
  6. Gusev N. I., Skachkov Yu. P., Kochetkova M. V. Self-leveling floors in premises for various purposes // *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2015. № 2. P. 13–16.
  7. Hofer, Roloff Primed and charged with bridging the cracks over industrial floors // *Paint & Ink International*, 1999. № 6. P. 8–10.
  8. Golovnev S. G., Kiyanets A. B., Gorbanenko V. M. Advantages of using magnesium screeds // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2004. № 7. P. 27–28.
  9. Epoxy floor topping resists acid // *Products Finishing*. 1996. № 2. C. 109.
  10. Morozov N. M., Krasnikova N. M., Borovskikh I. V. Factors affecting the destruction of concrete of road plates // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2015. № 7 (59). P. 30–38.
  11. Zvezdov A. I., Titov M. Yu. Concrete with compensated shrinkage for erecting crack-resistant structures of large extent // *Beton i zhelezobeton*. 2001. № 4. P. 17–20.

УДК 665.775

**Шеховцова С.Ю.** – кандидат технических наук, ассистент

E-mail: [rusina.svetlan@yandex.ru](mailto:rusina.svetlan@yandex.ru)

**Московский государственный строительный университет**

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

**Высоцкая М.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [roruri@rambler.ru](mailto:roruri@rambler.ru)

**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

Адрес организации: 308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

### **Влияние одностенных углеродных нанотрубок на температурный интервал работоспособности полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель работы – разработка составов эффективных наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих и улучшенных асфальтобетонов на их основе с расширенным температурным интервалом работоспособности. Изучение морфоструктурных особенностей модифицированных полимерно-битумных вяжущих.

*Результаты.* Изучено влияние содержания одностенных углеродных нанотрубок на основные физико-механические свойства полимер-битумных вяжущих. С помощью оптических методов и флуоресцентной микроскопии исследовано влияние наномодификаторов на морфоструктурные особенности полимерно-битумных вяжущих.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в том, что были разработаны эффективные асфальтобетоны с расширенным температурным интервалом работоспособности на основе наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих. Установлено рациональное содержание модифицирующей добавки (0,0001 %) в составе вяжущего, обеспечивающее достижение заданных параметров. Установлен характер влияния одностенных углеродных нанотрубок на морфоструктурные особенности, заключающийся в том, что наномодификатор инициирует процессы структурирования межфазных слоев, что приводит к упрочнению физических связей между макромолекулами полимера и дисперсной фазой органического вяжущего, что закономерно отразилось на улучшении теплостойкости вяжущего. Изучение пленок полимерно-битумных вяжущих позволило зафиксировать, что при введении наномодификатора наблюдается уменьшение макромолекул полимера и более равномерное их распределение по объему вяжущего, что обеспечивает его стабильность. Установлено, что введение рационального количества наномодификатора позволяет расширить необходимый температурный интервал работоспособности асфальтобетонного покрытия на 25-34 %, с одновременным сокращением содержания полимера на 38 %.

**Ключевые слова:** битум, полимер, одностенные углеродные нанотрубки, температурный интервал работоспособности, морфология, сдвигоустойчивость, трещиностойкость.

Строительство дорог ведут с древних времен, наиболее интересные и достоверные сведения дошли до нас о дорогах древнего Рима. Сеть дорог для регулярного сообщения начала складываться в Евразии уже в 5-ом тыс. до н.э. Древнейшие дороги монолитного покрытия не имели, и строились преимущественно из камня. И если раньше дорога строилась, как «физическая» необходимость для движения колеса, то сегодняшнее состояние сети дорог – это один из важнейших индикаторов экономики государства.

В современной России преобладают дороги с асфальтобетонным покрытием. Высокие темпы автомобилизации во второй половине XX века обусловили необходимость уделять состоянию дорог и транспортных сооружений больше внимания. В свете этого, проблемы повышения качества сырьевых материалов, также становятся крайне актуальными [1-5 и др.].

Развитие современного строительного материаловедения невозможно без создания материалов нового поколения, отвечающих современным эксплуатационным

требованиям. Самым перспективным направлением, на сегодняшний день, является использование наноразмерных модификаторов: нанотрубок и других углеродных каркасных структур [2-9].

Острая необходимость увеличения эксплуатационного срока службы дорожных покрытий, назрела и в дорожно-строительном материаловедении. Достичь этого можно посредством современных технологических и рецептурных параметров воздействия, в том числе и на молекулярном уровне, непосредственно на композиты или на их компонентные сырьевые материалы.

В современном дорожном строительстве, широкое применение нашли полимерно-битумные композиции или как их называют полимерно-битумные вяжущие (ПБВ). В общем виде – это битум, модифицированный полимером. Однако, ПБВ имеет ряд недостатков, таких как расслаиваемость, ввиду того, что это многокомпонентная система, а также она характеризуется склонностью к старению и низкой адгезией.

Поэтому, весьма популярна модификация различных полимеров наноструктурными модифицирующими добавками (наномодификаторами) [1, 4, 7]. Этот метод позволяет создавать композиты нового поколения, лишенные вышеуказанных недостатков, с улучшенными характеристиками, которые можно использовать для получения высокопрочных конструкционных, изоляционных строительных материалов. Ввиду этого модифицированные полимеры в строительстве переживают свое второе рождение и выходят на новую ступень развития. Для модифицирования полимерных композитов чаще всего используют нанотрубки (УНТ) и фуллерены, обладающие уникальными физико-механическими характеристиками, для направленного структурообразования строительных композитов.

УНТ обладают характеристиками, указывающими на перспективность их использования в строительной индустрии: колоссальная прочность; высокие значения удельной поверхности и удельной поверхностной энергии; инертность по отношению к любым кислотам и щелочам [4].

На сегодняшний день известно множество разновидностей УНТ, но также существуют некоторые сложности, затрудняющие их использование: отсутствие достоверных сведений о влиянии наноразмерных частиц на окружающую среду и здоровье человека; несовершенство технологического и лабораторного оборудования; скептическое отношение общества к нанотехнологиям, характеризующееся непониманием и недоверием; повышенная склонность УНТ к агрегации, что затрудняет их равномерное распределение по всему объему композита и др.

Последний факт не позволяет наиболее полно раскрыть возможности УНТ в композите, и использовать, например их высокий модуль упругости и прочность при очень низкой плотности [10].

В настоящий момент наиболее важными задачами в получении полимерных нанокомпозитов является равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице, а также обеспечение передачи нагрузки от матрицы к нанонаполнителю. Для решения первой задачи необходимо разрушить агрегаты нанонаполнителя и, затем, равномерно распределить его в матрице, что, как правило, осложняется высокой вязкостью полимера. Вторая задача заключается в обеспечении необходимого поверхностного взаимодействия на границе «матрица-наполнитель», в противном случае физико-механические свойства не будут реализованы в достаточной степени. Обозначенные проблемы и их решение, легли в основу выполнения исследования

В процессе постановки эксперимента решались следующие задачи:

1. Достижение равномерного распределения наномодифицирующего компонента в полимерной матрице, путем варьирования технологическими параметрами приготовления нано-прекурсора при приготовлении ПБВ;

2. Разработка эффективного битумного вяжущего, с высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями;

3. Уменьшение содержания полимера в ПБВ без ухудшения свойств вяжущего.

В качестве объектов исследования рассматривались: исходный материал одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), полученный методом термического испарения графита в присутствии Ni-Cr катализатора в электрической дуге (Arc ОУНТ), содержащий наночастицы графита длиной 20-100 нм и наночастицы металла диаметром 5 нм.



Образцы вяжущих готовились на основе битума БНД 60/90 («Московский» НПЗ). Установление влияния наномодификатора и оптимального его содержания осуществляли посредством варьирования концентрацией полимера (бутадиен-стирольный термоэластопласт) и ОУНТ в интервале 2,8-4,0 % и 0,005-0,0001 % соответственно. Интервал варьирования УНТ ограничен весовой точностью дозирования аналитических весов ВЛР 200. Содержание пластификатора было определено заранее при подборе контрольного состава вяжущего, отвечающего требованиям ГОСТ 52056-2003, оно составило 2,5 % [11].

Приготовление ПБВ осуществлялось по двухстадийной технологии, на первом этапе готовилась наноармированная матрица полимерного компонента; на втором этапе полимерный компонент вводился в битум и перемешивался до получения однородного эффективного полимерно-битумного вяжущего.

Подобный подход при приготовлении ПБВ был использован для обеспечения возможности оценки влияния ОУНТ и равномерности их распределения в полимерной матрице.

Приготовление наноармированной полимерной матрицы осуществляли посредством ультразвукового диспергирования ОУНТ в пластифицирующей среде с последующим введением полимера. Содержание ОУНТ варьировалось в интервале 0,005-0,0001 % от массы готового вяжущего. При объединении полимера с наномодифицированной пластифицирующей средой происходят процессы его набухания, с одновременной адсорбцией мальтеновой части битума. На углеводородных цепях макромолекул полимера адсорбируется часть легких углеводородов из мальтеновой среды битума, тем самым, замедляя переход масел в смолы и образование асфальтенов. Равномерное распределение звеньев полимера способствует достижению равновесия в растворе и стабильности композита, приготовленного на его основе.

Оценку равномерности и однородности полимерной матрицы проводили на инвертированном промышленном микроскопе Nikon Eclipse MA200, что обеспечивает использование интегрированной системы искусственного интеллекта для автоматического комбинирования полученных изображений с данными наблюдений по методу светлого и темного поля. В нашем случае был использован метод светлого поля, рис. 1.

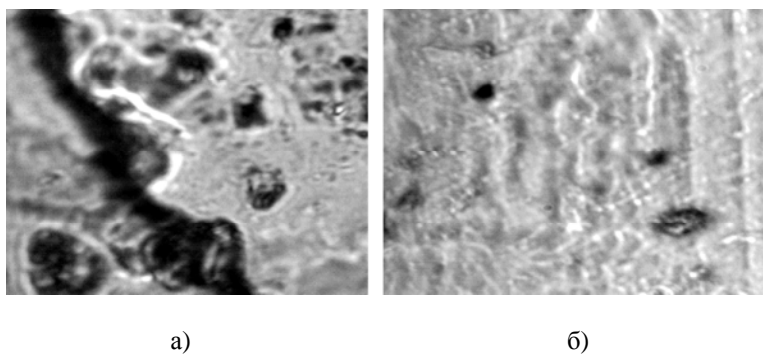


Рис. 1. Микрофотоснимок полимерного компонента, кратность  $\times 1000$ :  
а) контрольного состава; б) модифицированного ОУНТ

На рис. 1а наблюдается неоднородная структура, свидетельствующая о неравномерном распределении полимерного компонента в пластификаторе. При модифицировании полимерной матрицы (рис. 1б) идет процесс структурирования межфазных слоев, наномодификатор изменяет ее структуру. Становится возможным более равномерное распределение полимера в пластификаторе, о чем свидетельствует изображение, на котором наблюдаются незначительные объекты из нерастворенного полимера. Таким образом, осуществляется фазовый переход вяжущего из объемного состояния в пленочное, формируя граничные слои в структуре матрицы. Формируется структурированная матрица композита, которая обеспечивает высокие показатели эластичности наномодифицированного ПБВ при температурах испытаний 25 и 0 °С, за счет упрочнения структурных связей, с одновременным сохранением их гибкости [12].

Закономерно предположить, что многофакторное перемешивание ОУНТ сначала в

пластифицирующей среде, затем при объединении с полимером и на конечном этапе в составе полимерной матрицы в объеме битума, будет способствовать более равномерному распределению наноразмерных модификаторов в объеме вяжущего, а видимое структурирование придаст ПБВ совокупность полезных свойств. Что было подтверждено работами в лабораторных условиях при проведении эксперимента по исследованию свойств модифицированного ПБВ [11, 12].

Для установления эффекта влияния ОУНТ на изменение параметров структуры модифицированных вяжущих производилось изучение морфологии пленок ПБВ на флуоресцентном микроскопе Carl Zeiss, при кратности увеличения  $\times 1000$  (рис. 2). Флуоресцентная микроскопия – разновидность оптической микроскопии, использующая данное явление для изучения свойств органических и неорганических веществ, которая базируется на способности ряда веществ после поглощения света с одной длиной волны излучать свет с другой, как правило, большей длиной волны, что позволяет зафиксировать и визуализировать структурные изменения, скрытые от глаза наблюдателя.

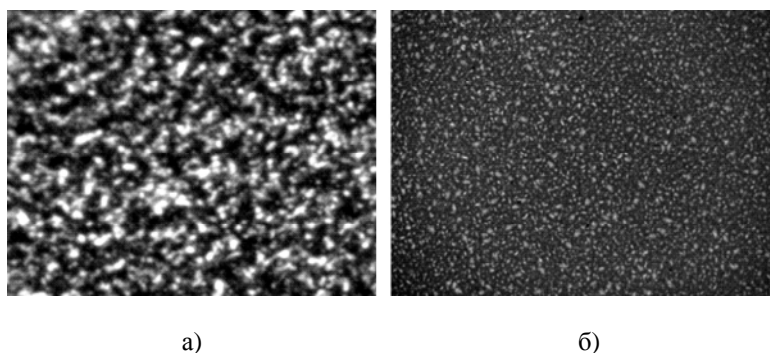


Рис. 2. Морфология поверхности полимерно-битумных вяжущих:  
а) контрольного состава; б) модифицированного ОУНТ

Как видно (рис. 2а), структура контрольного образца ПБВ (состав № 2) сложена из более крупных кластеров макромолекул полимеров, неравномерно распределённых по объему. При введении в состав ПБВ (состав № 5) наноразмерного модификатора (рис. 2б), наблюдается уменьшение макромолекул полимера и более равномерное их распределение по объему вяжущего – структурирование системы, способствующее обеспечению ее стабильности.

Зафиксированные структурные изменения нашли свое отражение в улучшении показателей свойств наноструктурированных вяжущих, которые характеризуются стабильными и высокими показателями когезии, эластичности, адгезии, температуры размягчения и низкими показателями температуры хрупкости, при одновременном сокращении содержания полимера [11, 12].

Разработанные составы ПБВ (табл. 1) характеризуются расширенным температурным интервалом работоспособности композиционного материала (табл. 2), что позволяет предположить, что его можно использовать в широком диапазоне знакопеременных эксплуатационных температур, значительно превышающих нормы для центрального федерального округа (состав № 5).

Таблица 1

Составы исследуемых образцов ПБВ

Наименование компонента	Номера образцов ПБВ				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Полимер, %	4,5	2,8	2,8	2,8	2,8
Наномодификатор, %	-	-	0,005	0,0005	0,0001
Пластификатор, %	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Битум, %	остальное				

Таблица 2

## Температурный интервал работоспособности ПБВ

Наименование показателя	БНД 60/90	Требование ГОСТ 52056-2003	Номера образцов ПБВ				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Температура размягчения по КиШ, °С	51	не менее 54	78	56	62	68	80
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-17	не более -20	-26	-21	-23	-25	-29

Анализ полученных результатов исследования (табл. 2) показал увеличение интервала работоспособности модифицированного ПБВ, при введении в его состав наноразмерных объектов в рассматриваемом диапазоне УНТ (состав № 5), с одновременным сокращением содержания полимера на 38 %. Полученные зависимости свойств, должны закономерно отразиться на работоспособности асфальтобетонного покрытия, выполненного с использованием разработанного ПБВ. Расчёт требуемого и необходимого диапазона рабочих температур асфальтобетонного покрытия, достаточного для обеспечения заданного срока его службы в конкретных природных условиях, осуществлялся по методике Ковалева Я.Н.

Расчетная зимняя температура трещиностойкости определяется по формуле:

$$t_{0min}=0,7 t_{bmin},$$

где  $t_{0min}$  – расчетная зимняя температура трещиностойкости асфальтобетонного покрытия, °С;  
 $t_{bmin}$  – расчетная зимняя температура наружного воздуха для наиболее холодных суток, °С:

$$t_{0min}=0,7 \cdot (-27) = \text{минус } 18,9 = \text{минус } 19 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

За расчетную летнюю температуру сдвигустойчивости асфальтобетонного покрытия с применением полимерно-битумного вяжущего принимают температуру дорожного покрытия в июле, которая определяется в соответствии СНиП 23.0-99, по формуле Я.Н. Ковалева:

$$t_{bmax} = J(1-A)K/\alpha_c + t_{всн},$$

где  $J$  – расчетный поток суммарной солнечной радиации для района эксплуатации, ккал/(м<sup>2</sup>ч) (п.8 СП 131.13330.2012), для Белгорода – 245 кВт ч/м<sup>2</sup>=282 ккал/(м<sup>2</sup>ч);

$A$  – альbedo покрытия, (коэффициент отражения), по Н.Я. Ковалеву - 0,11 для асфальтобетона;

$\alpha_c$  – суммарный расчетный коэффициент теплоотдачи асфальтобетонного покрытия, ккал/(м<sup>2</sup>ч°С):

$$\alpha_c = \alpha_u + \alpha_k,$$

$\alpha_u$  – коэффициент теплоотдачи за счет излучения; для асфальтобетонных покрытий по данным В.М. Сиденко  $\alpha_u = 3$  ккал/(м<sup>2</sup>ч°С),

$\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи за счет конвекции, ккал/(м<sup>2</sup>ч°С):

$$\alpha_k = 4,23V^{0,66} + 3,2e^{-1,28V},$$

где  $V$  – скорость ветра над покрытием для района эксплуатации, м/с, (5 м/с для II ДКЗ);

$$\alpha_k = 4,23 \cdot 5^{0,66} + 3,2e^{-1,28 \cdot 5} = 12,24 \text{ ккал/(м}^2\text{ч}^\circ\text{C)}.$$

Таким образом, суммарный расчетный коэффициент будет равен:

$$\alpha_c = 3 + 12,24 = 15,24,$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий часть поглащенного покрытием тепла, отдаваемого окружающему воздуху:

$$K = 0,15 + 0,052V = 0,15 + 0,052 \cdot 5 = 0,41,$$

где  $t_{всн}$  – температура воздуха в пограничном слое покрытия, °С, при скорости ветра от 0 до 1,0 м/с, определяется по формуле, полученной на основе графических данных Я.Н. Ковалева:

$$t_{всн} = (t''_{bmax} + 20) - 12V,$$

где  $t''_{bmax}$  – средняя максимальная температура наружного воздуха в июле, °С, (табл. 2 СНиП 23.01-99), для г. Белгород – 25,7 °С.

Температура воздуха в пограничном слое покрытия:

$$t_{всн} = (25,7 + 20) - 12 \cdot 1 = 33,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчетная летняя температура сдвигустойчивости асфальтобетонного покрытия:

$$t_{bmax} = 282(1 - 0,11)0,41/15,24 + 33,7 = 40,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В соответствии с используемой методикой, для Белгородской области, температуры трещиностойкости и сдвигустойчивости асфальтобетонного покрытия составляют  $-19^{\circ}\text{C}$  и  $+40,5^{\circ}\text{C}$  соответственно. Из табл. 2 видно, что разработанный наномодифицированный состав ПБВ (образец № 5) превышает необходимые требования по интервалу работоспособности композита: на 34 % по температуре хрупкости и на 97 % по температуре размягчения. Полученные данные характеризуют его как композит, обладающий повышенной сопротивляемостью пластическим деформациям в летнее время и трещинообразованию в зимний период. Что также было подтверждено при изучении свойств образцов асфальтобетона типа Г на основе трех образцов вяжущего (составы № 1, № 2, № 5). Выбор типа асфальтобетона обоснован тем, что композиты, в которых отсутствует прочный каркас из крупного минерального остова характеризуются большой чувствительностью вяжущего в его составе к восприятию нагрузок и температур. Что позволит оценить вклад именно модифицированного вяжущего, в свойстве асфальтобетона, приготовленного на его основе. Результаты сравнительного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Физико-механические показатели асфальтобетона типа Г, марки П**

Показатель	Требования ГОСТ 9128-2013	Используемое вяжущее		
		№ 1	№ 2	№ 5
Водонасыщение, %	1,5...4,0	1,8	2,3	1,8
Предел прочности при сжатии, МПа при температуре: +20 <sup>0</sup> С +50 <sup>0</sup> С +60 <sup>0</sup> С 0 <sup>0</sup> С				
	>2,2	4,6	4,2	4,9
	>1,2	2,3	1,7	2,6
	-	1,6	1,1	2,1
Водостойкость	>0,85	8,6	10,0	7,2
Водостойкость при длительном водонасыщении	>0,75	0,98	0,90	1,00
Теплостойкость R <sub>50</sub> / R <sub>20</sub>	-	0,89	0,81	0,98
Трещиностойкость R <sub>0</sub> / R <sub>50</sub>	-	0,5	0,4	0,53
		3,73	5,8	2,77

Анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет заключить, что состав № 2, с содержанием полимера – 2,8 % характеризуется повышенной чувствительностью к перепадам температур, что характерно для слабосвязанных структур. При введении в состав наномодификатора, при аналогичном содержании полимера (состав № 5) формируются прочные температуроустойчивые структурные связи, придающие композиту комплекс улучшенных показателей свойств. Закономерно предположить, что приготовление асфальтобетонов с более жесткой каркасной структурой (тип А, ЦМА) будут характеризоваться улучшенными показателями качества.

**Заключение**

Получены конкурентоспособные образцы асфальтобетона на основе наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих с расширенным температурным интервалом работоспособности. Установлено рациональное содержание модифицирующей добавки (0,0001 %) в составе вяжущего, обеспечивающее улучшение всего комплекса свойств композита с одновременным сокращением содержания полимера на 38 %. Показано, что введение одностенных углеродных нанотрубок на стадии приготовления полимерной матрицы инициирует процессы структурирования межфазных слоев, а за счет упрочнения структурных связей формируется «гофрированная» структура. Изучение пленок полимерно-битумных вяжущих с применением флуоресцентной микроскопии позволило зафиксировать, что при введении наномодификатора наблюдается уменьшение размеров макромолекул полимера и более равномерное их распределение по объему вяжущего, что обеспечивает ее стабильность. Установленные морфоструктурные особенности вяжущего закономерно отразились на улучшении свойств композита. Установлено, что введение рационального количества

наномодификатора позволяет расширить необходимый температурный интервал работоспособности асфальтобетонного покрытия на 25-34 %.

Полученные результаты исследований свидетельствуют об эффективности использования наноразмерных углеродных материалов для структурирования и упрочнения битумного вяжущего и асфальтобетона, приготовленного на его основе, что в свою очередь приведет к увеличению межремонтных сроков и продлению всего эксплуатационного периода асфальтобетонного покрытия.

### Список библиографических ссылок

1. Loos M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology. William Andrew. 2014. 304 p.
2. Высоцкая М. А., Кузнецов Д. А., Русина С. Ю., Чевтаева Е. В., Беликов Д. А. Тенденции развития наномодификации композитов на органических вяжущих в дорожно-строительной отрасли // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 6. С. 17–20.
3. Tibbetts G. G., Gorkiewicz D. W., Alig R. L. A new reactor for growing carbon fibers from liquid-and vapor-phase hydrocarbons // Carbon. 2013. Vol. 61. Iss. 5. P. 809–814.
4. Kim S. W. Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers // Carbon. 2012. Vol. 50. Iss. 1. P. 3–33.
5. Rodrigues R. Hydrostatic pressure sensors based on carbon spheres dispersed in polyvinyl alcohol prepared using hexadecyltrimethylammonium bromide as surfactant and water as solvent // Materials Research Express. 2014. Vol. 1. Iss. 1. P. 601–605.
6. Coleman J. N., Khan U., Gun'ko Y. K. Advanced Materials Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes // Advanced Materials. 2006. Vol. 18. Iss. 6. P. 698–706.
7. Zhang P. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes modified by rosemary acid into poly (vinyl alcohol) and preparation of their composite fibers // RSC Advances. 2015. Vol. 5. Iss. 68. P. 55492–55498.
8. Иноземцев С. С., Королев Е. В. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 29–39.
9. Li. S. Enhancement of carbon nanotube fibres using different solvents and polymers // Composites Science and Technology. 2012. Volume 72. Issue 12. P. 1402-1407.
10. Иноземцев С. С. Королев Е. В. Разработка наномодификаторов и исследование их влияния на свойства битумных вяжущих веществ // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 131–139.
11. Русина С. Ю., Киндеев О. Н., Антонова А. О. Исследование влияния вида пластификатора на свойства полимерно-битумного вяжущего : сб. ст. научно-практической конференции: Современные строительные материалы, технологии и конструкции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова / ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. Грозный, 2015. С. 301–305.
12. Vysotskaya M., Shekhovtsova S. Nanotubes as a modifier PMB and asphalt concrete // Advances in Engineering Research, International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering (ICSMME 2015). P. 177–179.

**Shekhovtsova S.Yu.** – candidate of technical sciences, assistant

E-mail: [rusina.svetlan@yandex.ru](mailto:rusina.svetlan@yandex.ru)

**Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26

**Vysotskaya M.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [roruri@rambler.ru](mailto:roruri@rambler.ru)

**Belgorod State Technological University named after V.G. Schukhov**

The organization address: 308012, Russia, Belgorod, Kostyukova st., 46

## The influence of single-walled carbon nanotubes in the temperature range of efficiency of polymer-bitumen binders and asphalt concretes on their basis

### Abstract

*Statement of the problem.* The purpose of the work – is to develop compositions of effective nanomodified polymer-modified binders and improved asphaltic concrete on their basis with an extended temperature range of efficiency. Study of morphostructural features of modified polymer-bitumen binders.

*Results.* The influence of the content of single-walled carbon nanotubes on the main physico-mechanical properties of polymer-modified binders was studied. Using optical methods and fluorescence microscopy, the influence of nanomodifiers on the morphostructural features of polymer-bitumen binders has been studied.

*Conclusions.* The significance for the construction industry lies in the fact that effective asphalt-concrete has been developed with an extended operating temperature range based on nanomodified polymer-bitumen binders. The rational content of the modifying additive (0,0001 %) in the binder composition was established, which ensures achievement of the specified parameters. The character of the effect of single-walled carbon nanotubes on morphostructural features is established, which consists in the fact that the nanomodifier initiates the processes of structuring interphase layers, which leads to strengthening of physical bonds between macromolecules of the polymer and the disperse phase of the organic binder-a «corrugated» structure is formed. The study of films of polymer-bitumen binders made it possible to note that when a nanomodifier is introduced, the polymer macromolecules are reduced and their distribution over the volume of the binder more uniform, which ensures its stability. It has been established that the introduction of a rational amount of nanomodifier allows to expand the required temperature range of the asphalt-concrete coating serviceability by 25-34 %, while reducing the polymer.

**Keywords:** bitumen; polymer; single-walled carbon nanotubes, the temperature interval of efficiency, morphology, shear resistance, crack resistance.

### References

1. Loos M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology. William Andrew. 2014. 304 p.
2. Vysotskaya M. A., Kuznetsov D. A., Rusina S. Yu., Chevtavaeva E. V., Belikov D. A. Trends nanomodification composites of organic binders in road construction industry // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Schushova. 2013. № 6. P. 17–20.
3. Tibbetts G. G., Gorkiewicz D. W., Alig R. L. A new reactor for growing carbon fibers from liquid-and vapor-phase hydrocarbons // Carbon. 2013. Vol. 61. Iss. 5. P. 809–814.
4. Kim S. W. Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers // Carbon. 2012. Vol. 50. Iss. 1. P. 3–33.
5. Rodrigues R. Hydrostatic pressure sensors based on carbon spheres dispersed in polyvinyl alcohol prepared using hexadecyltrimethylammonium bromide as surfactant and water as solvent // Materials Research Express. 2014. Vol. 1. Iss. 1. P. 601–605.
6. Coleman J. N., Khan U., Gun'ko Y. K. Advanced Materials Mechanical Reinforcement of Polymers Using Carbon Nanotubes // Advanced Materials. 2006. Vol. 18. Iss. 6. P. 698–706.
7. Zhang P. Dispersion of multi-walled carbon nanotubes modified by rosemary acid into poly (vinyl alcohol) and preparation of their composite fibers // RSC Advances. 2015. Vol. 5. Iss. 68. P. 55492–55498.
8. Inozemtsev S. S., Korolev E. V. Operational properties of nanomodified stone mastic asphalt // Vestnik MGSU. 2015. № 3. P. 29–39.
9. Li. S. Enhancement of carbon nanotube fibres using different solvents and polymers // Composites Science and Technology. 2012. Vol. 72. Iss. 12. P. 1402–1407.
10. Inozemtsev S. S., Korolev E. V. Development of nanomodifiers and research into their influence on the properties of bituminous binders // Vestnik MGSU. 2013. № 10. C. 131–139.
11. Rusina S. Yu., Kindeev O. N., Antonova A. O. Study of the effect of type of plasticizer on the properties of polymer-bitumen binder: dig. of art. of the scientific-practical conference: Modern building materials, technology and design, dedicated to the 95th anniversary of FGBOU VPO GGNTU after acad. M. D. Millionshtchikov / GGNTU after acad. M. D. Millionshtchikov. Grosny, 2015. P. 301–305.
12. Vysotskaya M., Shekhovtsova S. Nanotubes as a modifier PMB and asphalt concrete // Advances in Engineering Research, International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering (ICSMME 2015). P. 177–179.



УДК 69.009

**Коклюгина Л.А.** – кандидат технических наук, доцент,

E-mail: [the-lusy@mail.ru](mailto:the-lusy@mail.ru)

**Коклюгин А.В.** – старший преподаватель

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Выбор вариантов реконструкции малоэтажных жилых зданий с учетом требований инвестиционных строительных проектов**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования – выявить возможность продления срока эксплуатации малоэтажных крупнопанельных жилых домов, построенных в середине прошлого века, с учетом реконструкции и особенностей финансирования инвестиционных строительных проектов в г. Казани.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в рассмотрении проблемы реконструкции домов массовой застройки. Доказано, что состояние жилых домов должно определяться не по году строительства и сдачи в эксплуатацию, а по результатам технического обследования, выполненного специализированной организацией. По результатам обследования нужно принимать решение о сносе или реконструкции с обеспечением комфортного проживания. Рассмотрены варианты реконструкции таких домов путем сохранения несменяемых конструкций (фундаментов, стен, перекрытий) и возможности нахождения оптимального варианта по существующим критериям оценки и выбора для участников проекта с учетом производства работ в условиях сложившейся городской застройки.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в разработке механизма принятия оптимального конструктивного и организационно-технологического решения реконструкции домов массовой застройки с учетом надежности инвестиционных строительных проектов, их рентабельности и интересов участников в случае недостаточного финансирования.

**Ключевые слова:** малоэтажные крупнопанельные дома, варианты реконструкции, критерии оценки и выбора.

Проблемы эксплуатации жилых домов массовой застройки 1950-1960-х годов остро стоят как для жителей этих домов, так и для властей города.

Для решения жилищной программы, предполагавшей расселение жителей из коммунальных квартир, а также временного неблагоустроенного жилья (баракы, вагончики и т.п.) использовались методы индустриального строительства. Жилищная программа предполагала строительство экономичных пятиэтажных жилых домов с упрощенными объемно-планировочными решениями, с максимальным использованием сборных конструкций, поставляемых домостроительными комбинатами.

Программа была успешно реализована, причем путем комплексной застройки микрорайонов с одновременным строительством магистральных дорог, предприятий бытового обслуживания, школ, детских садов, игровых площадок, спортивных сооружений, зеленых зон.

В настоящее время остро стал вопрос о реконструкции микрорайонов массовой застройки середины прошлого века. Вызвано это тем, что во многих городах отсутствуют площадки для нового жилищного строительства. Известно, что стоимость реконструкции ниже стоимости нового строительства. Отсюда понятен интерес застройщиков и инвесторов к новым проектам. Но, как показывает опыт, без государственной поддержки такие проекты не могут быть выполнены.

В Москве проблему отсутствия площадей для застройки будут решать путем сноса малоэтажных жилых домов массовой застройки. Но это один из вариантов, возможность применения которого вызвана очень высокой стоимостью земли под этими домами, а также удобным расположением и высоким уровнем благоустройства данных

микрорайонов. Такие проблемы должны решаться комплексно с учетом многих факторов и таких местных особенностей, как наличие большого количества аварийных и ветхих домов.

В Казани вопрос о реновации не стоит так остро, как в Москве, по многим причинам. Но есть острая необходимость замены аварийного жилья.

При проведении технического обследования домов старой постройки сомнений в компетенции специалистов не возникает. Однако возникает вопрос, участвовали ли они в данной работе, пусть не в Германии, но хотя бы в Казани. Вскрытие стыков стеновых панелей жилых домов серии 605 в целях герметизации швов ремонтно-строительными организациями показало отличное состояние сварных соединений монтажных связей и закладных деталей конструкций. Это обусловлено соблюдением технических и проектных норм. После сварочных работ производилось цинковое газопламенное напыление согласно проектной документации. Говорить об окончании срока эксплуатации этих домов массовой застройки некорректно. Следует заметить, что некоторые «специалисты» определяют его 1930-1950 годами. Эти здания возводились из долговечных материалов, которые обеспечивают срок службы 100-150 лет при правильной эксплуатации и своевременном проведении текущего ремонта.

Состояние жилых домов должно быть определено по результатам обследования технического состояния, выполненного специализированной организацией, а не по году строительства и сдачи в эксплуатацию.

Проведенные обследования, в том числе и в Германии (типовая застройка военных городков Группы Советских войск), показали возможность продления эксплуатации типовых серий до 100-150 лет. Это явилось основой для проведения работ по комплексной реконструкции существующего жилищного фонда.

Анализ жилищного фонда г. Казани показывает, что до 95 % составляют дома, введенные в эксплуатацию до 1995 г., в том числе около 50 % в период массовой застройки (1956-1970 гг.), общая масса которых составляет значительное количество. Но на сегодня именно эта «возрастная» группа жилых домов более всего нуждается в реконструкции, в капитальном и текущем ремонте. Однако по результатам различных государственных программ ни ремонт, ни реконструкция не были реализованы, либо реализованы с нулевым или откровенно отрицательным эффектом для жителей этих домов.

Для комплексного решения проблемы необходимо разработать механизм принятия оптимальных конструктивных и организационно-технологических решений с учетом надежности инвестиционных проектов и их рентабельности. Такие проекты ежегодно выполняются как за счет государственного и местного бюджета, так и за счет средств частных инвесторов. Однако темпы производства работ невелики по ряду объективных причин.

Наиболее распространенными в г. Казани являются кирпичные жилые дома серии 1-447 и крупнопанельные дома серии 1-464. Имеющиеся на данный момент у этих жилых домов морально-эстетические недостатки были вызваны не только экономическими, но и технологическими причинами, выразившимися в недостаточном количестве башенных кранов (основных механизмах) грузоподъемностью свыше 5 тонн.

Преимуществами этих панельных домов являлся меньший расход стали на 15-20 %, простота монтажа и высокая степень заводской готовности с учетом того, что все сборные элементы изготавливались на домостроительных комбинатах.

Практика обследования технического состояния таких домов, проводившаяся для выполнения капитального ремонта, показала весьма хорошую надежность, которая позволяет выполнять работы по реконструкции, даже связанные с надстройкой этажей, с получением дополнительных площадей с минимальными затратами.

В зависимости от степени сложности работы по реконструкции могут быть представлены следующими вариантами:

- Восстановление надежности несущих и ограждающих конструкций без перепланировки (по сути, является капитальным ремонтом);
- Частичная перепланировка помещений в пределах одной квартиры с целью улучшения эксплуатационных качеств;
- Перепланировка квартир в пределах секции или этажа (квартиры в двух уровнях), но без увеличения строительного объема здания;



• Перепланировка квартир путем надстройки этажей или пристройки к основному зданию (наиболее часто встречается пристройка балконов, эркеров и лоджий, что позволяет увеличить площадь кухни).

Затраты составляют:

- Без изменения строительного объема – 25-30 %;
- С увеличением строительного объема – 30-50 % от восстановительной стоимости.

Реконструкция жилых зданий с увеличением строительного объема позволяет наиболее полно решать задачи строительства комфортного жилья и объектов обслуживания населения. Однако в данном случае предполагается отселение жильцов, что очень затратно и не всегда практически выполнимо.

Известно, что восстановительная стоимость – это текущая рыночная стоимость имущества с учетом амортизации за весь период эксплуатации. Это стоимость копии здания на дату оценки в текущих ценах без учета накопленного износа.

Выбор варианта конструктивно-технологического решения реконструкции жилого дома предполагает учет интересов всех участников:

- Жильцов (владельцев квартир)
- Инвестора
- Управляющей компании, обслуживающей дом
- Властей города и района
- Арендаторов нежилых помещений в доме
- Жителей соседних домов

Оценка же конструктивно-технологического решения на предмет эффективности использования в настоящее время осуществляется по критериям оценки. Известна классификация критериев развития конструктивных и технологических решений в общем виде:

1. Функциональные (технические) критерии – интенсивность функционирования технических объектов, надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, точность, стабильность различных физических параметров в процессе функционирования объекта, прочность.

2. Технологические критерии – трудоемкость изготовления, технологические возможности выполнения, использование различных материалов, членение технического объекта на элементы.

3. Экономические критерии – затраты материалов, энергии, затраты на получение и подготовку информации, габаритные размеры.

4. Антропологические (социальные) критерии – эргономичность, красота, безопасность, экологичность.

Практическое использование всех групп критериев представляет исключительно сложную задачу. Ясно, что оценка объекта потребует назначения веса каждого критерия. Такая многокритериальная задача не может быть решена в рамках объективных моделей. Поэтому наибольшее распространение в практике проектирования получили отдельные группы указанных критериев.

Следует также обеспечить оптимальность конструктивной формы реконструируемых зданий и сооружений. Известно, что процесс развития и совершенствования конструктивных форм предполагает нахождение таких параметров, которые позволили бы определить оптимальный вариант. Определять оптимальность можно разными методами – вариантными, аналитическими, по каждому показателю отдельно, либо комплексно на основе опыта проектирования. Однако обязательный комплексный учет всех основных критериев является главной трудностью проектирования.

В практике строительства применяются различные конструктивно-технологические решения реконструкции малоэтажных жилых зданий первых массовых серий в зависимости от индустриально используемых технологий, материалов и конструктивных элементов. Они могут быть представлены в виде четырех уровней сложности и капиталности.

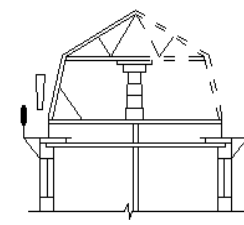
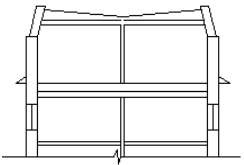
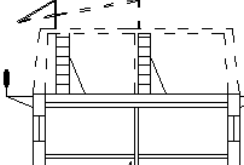
- Надстройка мансардных этажей;
- Пристройка малых объемов к фасадным поверхностям зданий в сочетании с мансардными этажами;
- Надстройка 1-3 этажами без перепланировки реконструируемых зданий;

- Расширение корпусов зданий с надстройкой до 9 этажей.

Приведенный комплекс имеет достаточно широкий диапазон конструктивных, организационно-технических и технологических решений, что позволяет с учетом сложившейся экономической ситуации, региональных условий и традиций применить один из рассматриваемых вариантов, например, надстройка мансардных этажей в условиях плотной городской застройки (табл.).

Таблица

**Конструктивные и организационно-технологические решения реконструкции жилых зданий массовых серий без применения монтажных механизмов**

№ п/п	Конструктивная схема	Технологическая схема производства работ	Конструктивно-технологические особенности
. Надстройка мансардных этажей			
1			1 этап. Устройство монолитного железобетонного обвязочного пояса; 2 этап. Каркас из деревометаллических шпренгельных ферм по стойкам и обвязочному брусу. Утепление из минераловатных плит; 3 этап. Ручная сборка из полуферм.
2			1 этап. Устройство несъемной опалубки из пенополистирольных блоков; 2 этап. Подача и укладка бетонной смеси с устройством мон. пояса по периметру стен; 3 этап. Ручная сборка опалубки и армирование.

По мнению ученых, технологический критерий относится к одному из основных показателей прогрессивности, т.к. он отражает степень рассогласования технических новшеств и организации технологического процесса в строительстве.

Следует учесть, что критерий технологичности тесно связан с другими критериями, например, стоимостными. Иногда этот критерий приходится заведомо ухудшать для улучшения более важных критериев в новых поколениях. Предполагается, что при проведении отработки конструкции кроме основных требований новизны, перспективности и других показателей технологичности следует учитывать показатели качества изделия, в том числе показатели назначения, надежности, эргономичности. Диапазон и характер изменения значения технологического критерия во времени варьируется от 0 до 1.

Однако правильно подсчитать трудоемкость выполнения работ особенно в мелкосерийном и единичном производстве достаточно сложно. Известно, что почти единственным возможным методом нормирования является субъективная оценка нормировщиком трудоемкости операции. Даже при большом опыте нормировщика часто возникают ошибки, что ведет к погрешностям в определении трудоемкости работ.

Реконструкция с надстройкой мансардных этажей чаще всего осуществляется в стесненных условиях городской застройки, когда прилегающие территории имеют постоянную систему дорог, инженерных сетей, площадок для отдыха, засаженных зелеными насаждениями и т.п. Поэтому есть факторы, исключаяющие проектное расположение средств механизации, зон складирования, мест приема материалов и полуфабрикатов. В каждом случае должна быть разработана индивидуальная технологическая карта по надстройке мансарды по примеру существующего здания, расположенного по адресу: г. Казань, ул. Р. Зорге, д. 13. Данная технологическая карта может применяться к другим жилым зданиям серии 1-464. Работы могут производиться в течение всего года. Производство работ осуществляется без отселения жильцов с обеспечением мер безопасности работающих и жильцов (рис.).



7. Терехов А. С. Новый генеральный план Минска в аспекте политики расселения жителей Беларуси // Архитектура и строительство. Республика Беларусь. 2015. № 6. <http://arcp.by/ru/article/novyy-generalnyy-plan-minska-v-aspekte-politiki-rasseleniya-zhiteley-belarusi> (дата обращения: 22.10.2017).
8. Khumpaisal S., Chen Z. Risk assessment in real estate development: an application of analytic network process // Journal of Architectural. Planning Research and Studies. 2010. № 7 (1). P. 103–116.
9. Murray S. L. Grantham K. Development of a Generic Risk Matrix to Manage Project Risks // Journal of Industrial and Systems Engineering. 2011. № 5 (1). P. 35–51.
10. Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-stroitel'nogo-proizvodstva-v-monolitnom-domostroenii-na-osnove-otsen#ixzz46LZGc1Fe> (дата обращения: 22.10.2017).

**Kokliugina L.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [the-lusy@mail.ru](mailto:the-lusy@mail.ru)

**Kokliugin A.V.** – associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **The selection of options for reconstruction of low-rise residential buildings, considering the requirements of investment construction projects**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the research is to identify the possibility of extending the life of low-rise large-panel residential buildings built in the middle of the last century, considering the reconstruction and features of financing investment construction projects in Kazan.

*Results.* The main results of the research contain the problem of reconstruction of houses of mass development. It is proved that the condition of residential buildings should be determined not by the year of construction and commissioning, but by the results of a technical survey carried out by a specialized organization. Based on the results of the survey, it is necessary to take a decision on demolition or reconstruction with the provision of comfortable living. The options for the reconstruction of such houses are considered by preserving non-replaceable structures (foundations, walls, overlappings) and the possibility of finding the optimal variant according to the existing criteria for evaluation and selection for the project participants, considering the production work in the conditions of the existing urban development.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for construction industry consists in developing a mechanism for adopting the optimal constructive and organizational and technological solution for the reconstruction of houses of mass development, considering the reliability of investment construction projects, their profitability and the interests of participants in case of insufficient financing.

**Keywords:** low-rise large-panel houses, reconstruction options, evaluation and selection criteria.

#### **References**

1. Morozova T. F, Zayashnikov R. A., Yakunina Yu. I. Choice of organizational and technological solutions for the reconstruction of objects without termination of operation // Young Scientist. 2016. № 3. P. 162–168.
2. Lyudkovskiy A. M. Experience of strengthening the reinforced concrete frame with flat capitals installed on top of the overlap // Vestnik MGSU. 2015. № 4. P. 80–89.
3. Koklyugina L. A. Influence of the factor of the duration of construction of objects when making managerial decisions at the time of tenders // Izvestiya KGASU. 2015. 3 (33). P. 262–268.

4. Karaoglanov V. G. Evaluation of the effectiveness of organizational and technological solutions in the reconstruction of buildings. M. : CSRIOMTA, 2006. 178 p.
5. Imaikin D. G., Ibragimov R. A. The research of factors affecting on the tent building materials lifetime // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18. № 14. P. 120–123.
6. Sormunen P. Energy efficiency of buildings the situation in Finland // Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal. 2010. № 1. P. 7–8.
7. Terekhov A. S. The new general plan of Minsk in the aspect of the policy of settling the inhabitants of Belarus // Architectura i stroitelstvo. Republic of Belarus. 2015. № 6. <http://arcp.by/ru/article/novyy-generalnyy-plan-minska-v-aspekte-politiki-rasseleniya-zhiteley-belarusi> (reference date: 22.10.2017).
8. Khumpaisal S., Chen Z. Risk assessment in real estate development: an application of analytic network process // Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 2010. № 7 (1). P. 103–116.
9. Murray S. L., Grantham K. Development of a Generic Risk Matrix to Manage Project Risks // Journal of Industrial and Systems Engineering. 2011. № 5 (1). P. 35–51.
10. Scientific library of dissertations and abstracts disserCat <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-stroitel'nogo-proizvodstva-v-monolitnom-domostroenii-na-osnove-otsen#ixzz46LZGc1Fe> (reference date: 22.10.2017).

УДК 69.05

**Мухаметрахимов Р.Х.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

**Вахитов И.М.** – инженер

E-mail: vakhitovim@gmail.com

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Инновационные технологии внедряются практически в каждую отрасль жизнедеятельности человечества, однако одна из таких крупных отраслей как строительное производство, на сегодняшний день отличается высокими трудозатратами и является наименее автоматизированной. Переход от классических технологий возведения зданий к аддитивным при помощи строительной 3D-печати может стать решением данной проблемы. В настоящий момент времени строительные 3D-принтеры активно внедряются в строительное производство в Китае, США, Нидерландах. На фоне стремительно развивающихся в этой сфере стран, Россия не является аутсайдером и на сегодняшний день имеет в своем числе ряд организаций разрабатывающих и выпускающих свою продукцию 3D-принтеров (ООО «СпецАвиа», г. Ярославль; ООО «АписКор», г. Москва).

*Результаты.* В статье приводится анализ аддитивной технологии возведения зданий и сооружений. Рассмотрены история развития, способы 3D-печати и виды строительных 3D-принтеров. Дано краткое описание напечатанных ограждающих конструкций и используемых материалов.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в анализе достоинств и недостатков аддитивной технологии возведения зданий и сооружений, а также выявление перспектив и направлений ее развития.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительный 3D-принтер, 3D-печать, технологии возведения зданий и сооружений, строительное производство.

#### Введение

На сегодняшний день, строительство – одна из важнейших отраслей, обеспечивающая как развитие экономики, так и повседневный комфорт населения. Эта отрасль является одним из лидеров по числу рабочих мест, как в стране, так и во всем мире. В то же время современные требования к строительству подразумевают дальнейшее совершенствование технологий строительного производства, ее значительную трансформацию. Изменения в этой сфере происходят медленно, но, тем не менее, и в типовом, и в индивидуальном строительстве постепенно начинают применяться новые материалы, обеспечивающие повышенный комфорт, экологичность и экономичность при эксплуатации, внедряются новые технологии, позволяющие существенно автоматизировать процесс воплощения проектов в реальность, которые значительно сокращают количество необходимой рабочей силы, а также минимизировать риск производственных травм. Одной из таких перспективных технологий является применение аддитивной технологии возведения зданий при помощи строительной 3D-печати на строительных площадках [1].

3D-печать архитектурных сооружений вызывает большой интерес специалистов уже несколько лет. Следует отметить, что в настоящее время одной из немногих полностью не автоматизированных отраслей производства является строительство. С применением строительного 3D-принтера появилась возможность не только создания небольших конструкций (строительных блоков, малых элементов ландшафтного дизайна и интерьера помещений), но и возведения ограждающих конструкций зданий. Эта технология позволяет возводить более сложные объекты с пониженными временными, материальными и трудозатратами.

В настоящее время концепция строительства при помощи 3D-принтеров уже заинтересовала несколько крупных строительных компаний, порядка 35 организаций занимаются разработкой прототипов данного оборудования. Игроки на этом рынке преследуют разные задачи – вторичную переработку строительных отходов; создание технологий «безфундаментной» печати; строительство домов в местностях, пострадавших от стихийных бедствий и требующих возведение большой площади жилья за короткий период времени; производство и совершенствование оборудования и т.д. [2].

Не смотря на существующие примеры выполненных малых архитектурных форм, объектов индивидуального жилищного строительства по данной технологии, как в России, так и за рубежом, требуется ее исследование и развитие, что в перспективе расширит область ее применения, повысит качество получаемой строительной продукции и вызовет необходимость в разработке нормативных документов регламентирующих данное направление.

### **История развития 3D-печати**

Работа человечества в сфере цифровых технологий, на протяжении многих лет, привела к идеи послойного создания объектов с помощью 3D-принтера по заранее разработанной математической модели. Данная технология нанесения материала на основу называется аддитивной. В случае традиционного производства подобных объектов, мы изначально имеем заготовку, от которой, например, отсекаем все лишнее, либо деформируем ее, то в случае с аддитивной технологией из аморфного расходного материала выстраивается новое изделие [3].

3D-печать ведёт свою историю с 1948 года, когда американец Чарльз Халл разработал технологию послойного выращивания физических трёхмерных объектов из фотополимеризующейся композиции (ФПК). Технология получила название «стереолитографии» (STL). Патент [4] на своё изобретение автор получил только в 1986 году, тогда же он основал компанию 3D System и приступил к разработке первого промышленного устройства для трёхмерной печати, которое было представлено общественности год спустя, в 1987 году. Так как термин «3D-принтер» ещё не был введён в оборот, аппарат Чарльза Хала получил название «установка для стереолитографии». Устройство выращивало смоделированный на компьютере трёхмерный объект из жидкой фотополимеризующейся композиции, нанося её слой за слоем на подвижную платформу, погружаемую в ванну с ФПК. Толщина каждого слоя составляла примерно 0,1-0,2 мм [5].

В 1988 году Скотт Крамп (США) запатентовал технологию трехмерной печати с помощью послойной заливки расплавленной нити полимера (FDM) [6]. В печатающей головке материал (расплав из пластика) предварительно разогревается до температуры плавления и поступает в рабочую камеру. Головка выпускает расплавленный материал в виде нити, которая укладывается на рабочую поверхность. После этого платформа опускается ниже на толщину одного слоя, для повторного воспроизведения процесса. Первое коммерческое устройство на основе технологии FDM появилось в 1991 году под торговой маркой Stratasys [7].

В начале XXI века сразу несколько независимых групп ученых, из разных стран, начали исследования в области технологии 3D-печати в сфере строительства. В 2012 году были представлены первые потребительские строительные 3D-принтеры, а уже через два года был возведен первый экспонат одноэтажного жилья компанией Shanghai WinSun (Китай) [8].

### **Способы 3D-печати в строительстве**

На данный момент для создания объектов промышленности, машиностроения, пищевого производства и других отраслей, существует множество способов 3D-печати: лазерная стереолитография, селективное лазерное спекание, моделирование методом наплавления, ламинирование, склеивание порошков.

Для создания малых форм и целых объектов строительства используются три основных метода: спекание; лазерная стереолитография; послойное экструдирование.

Суть *способа спекания (селективное спекание)* заключается в том, что рабочие чернила, к примеру, кварцевый песок, расплавляются за счет действия точечного лазерного луча, направление траектории которого приводится в действие с помощью кулачкового механизма. Механизм перемещения обрабатываемого материала приводится в движение небольшим двигателем, запускающим движение зубчатого ремня привода распределительного вала. Одновременно сфокусированная шаровая линза насквозь прожигает материал, находящийся под ней. Производством такого вида оборудования занимается его изобретатель, инженер Маркус Кайзер [9].

Для реализации *способа напыления (лазерная стереолитография)* используют лазерную установку с ванной, оборудованной специальным столом. Эту ванну заполняют жидкой фотополимеризующей под воздействием лазерного луча композицией. Спекание материала выполняется послойно, путем перемещения лазерного луча по намеченной траектории. При завершении обработки первого слоя стол ванны опускается на шаг, и выполняется формирование следующего слоя. На сегодняшний день известны рабочие образцы группы Каталонского института передовой архитектуры (IAAC) (группа Петра Новикова), полученные способом компонентной склейки, под названием Stone Spray Robot, а также система D-Shape, разработанная Энрико Дини для строительства зданий (Monolite UK) [10].

Способы напыления и селективного спекания являются экологически безвредными, поскольку их реализация подразумевает использование солнечной энергии, а рабочей смесью является песок.

*Способ послойного экструдирования* на сегодня является основным способом 3D-печати большинства строительных принтеров. Суть заключается в том, что рабочее сопло, или экструдер, 3D-машина выдавливает быстротвердеющую бетонную смесь, в которую включены различные добавки, улучшающие характеристики будущей конструкции [11]. Каждый очередной слой выдавливается 3D-принтером поверх предыдущего, благодаря чему формируется определенная конструкция [12] (рис. 1). Впервые о подобной технологии в строительстве было упомянуто в работах профессора Бехроха Хошнеvisa из Южно-Калифорнийского университета в августе 2012 г. [13, 14]. Его научная группа выдвинула идею конструкции гигантского, собираемого на строительной площадке 3D-принтера по типу козлового крана [15].

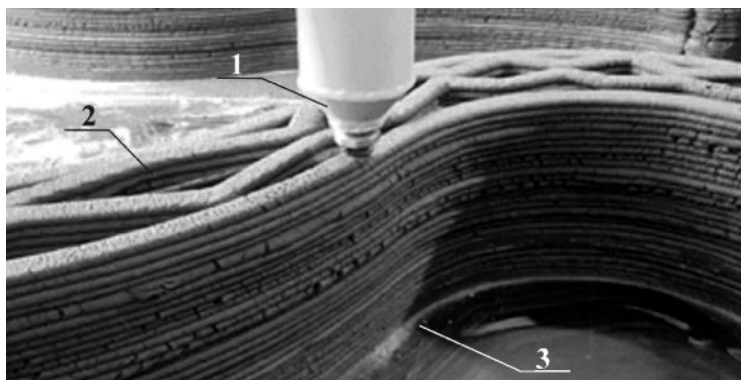


Рис. 1. Изготовление ограждающих конструкций способом послойного экструдирования при помощи 3D-принтера:

1 – сопло (экструдер); 2 – изготавливаемая ограждающая конструкция; 3 – основание

Выполненный обзор методов 3D-печати показывает, что на сегодняшний день в области строительного производства одним из наиболее эффективных является способ послойного экструдирования.

#### **Виды строительных 3D-принтеров, работающих способом послойного экструдирования**

Строительные принтеры, принципиально не отличаются от производственных 3D-принтеров и представляют собой их конструктивные аналоги, но больших размеров.



Существуют различные компоновки приводов данного устройства – порталные, с дельта-приводом, работающие в угловых координатах, на базе промышленных манипуляторов.

3D-принтеры с *портальной компоновкой привода* – это машины, напоминающие по виду козловые краны, движущиеся по рельсам, с длинной рамой, расположенной над рабочей зоной (рис. 2). По раме движется сопло или экструдер – устройство для подачи строительных чернил. За счет синхронизации движения рамы по рельсам, печатающей головки по ширине и высоте, подаче строительного материала, экструдер послойно выдавливает смесь, повторяя цифровой шаблон, заложенный в программном комплексе операционистом. Таким образом, осуществляется движение в трех взаимно-перпендикулярных направлениях – по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Преимуществом порталного привода является простота, надежность и относительно невысокая стоимость установки. В качестве недостатков можно отметить повышенные объемы работ, связанные с установкой оборудования в проектное положение, а также большие габариты устройства данного типа [15].

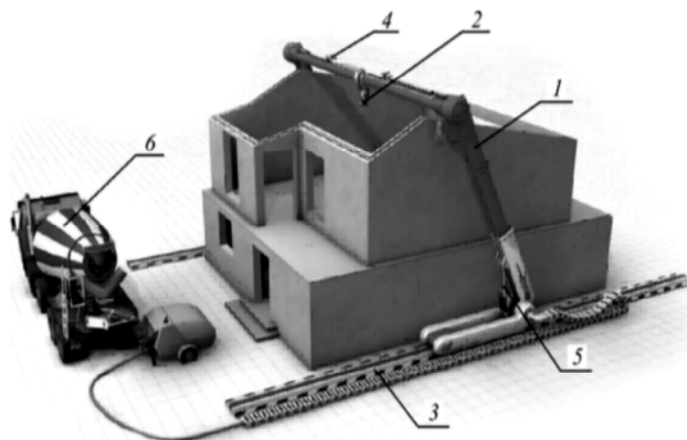


Рис. 2. Система для печати зданий с помощью принтера с порталной компоновкой привода:  
 1 – рама; 2 – печатающий оголовок (экструдер); 3 – рельсы, направляющие вдоль здания;  
 4 – механизм передвижения экструдера поперек рабочей поверхности;  
 5 – устройство для поднятия конструкции принтера по оси  $z$ ;  
 6 – автобетоносмеситель для подачи строительных чернил

3D-принтеры с *дельта-приводом* (трех осевые) представляют собой перевернутую треногу, состоящую из трех тросов или штанг, на которых держится печатающая головка, и высокой рамы, на которой закреплены машины управляющие подачей тросов или штанг [16] (рис. 3). Печатающая головка движется за счет синхронного изменения длины тросов, повторяющих заложенный в программном комплексе шаблон. Недостатком устройства является ограниченное пространство рабочей зоны, а также трудоемкий процесс сборки каркаса данной установки.



Рис. 3. Строительный 3D-принтер с дельтовидным приводом:  
 1 – каркас установки; 2 – тросы; 3 – печатающий оголовок

Строительные 3D-принтеры *работающие в угловых координатах* (в виде башенного крана) представляют собой автоматизированное устройство для строительства зданий и сооружений методом трехмерной печати [17] (рис. 4). Вес установки составляет всего 2 т, исходя из этого ее легко разместить с помощью автокрана как внутри здания, так и снаружи, в зависимости от проекта воздвигаемой постройки. Принтер имеет небольшие габариты, поэтому легко транспортируется и не требует долгой подготовки до начала работ. Недостатком устройства является ограниченная зона действия, в следствие чего в процессе возведения сооружения необходимо прибегать к помощи вспомогательной техники для перемещения принтера по рабочей зоне. Другим недостатком принтера Aris Cor является его стоимость, которая значительно превышает цену порталного устройства. Производством данного продукта занимается одноименная российская компания ООО «АПИС-КОР», которая на сегодняшний момент привлекла интерес к своему проекту от крупных инвесторов и в перспективе планирует распространять свое изобретение как в России, так и в странах Европы [18].



Рис. 4. Мобильный строительный 3D-принтер ArisCor, работающий в угловых координатах:  
1 – стрела установки; 2 – экструдер; 3 – изготавливаемая ограждающая конструкция

Принтер *на базе промышленного манипулятора* представляет собой конструктивные аналоги механических рук – манипуляторов, состоящих из нескольких гибких сочленений, придающих им большую подвижность [16] (рис. 5). Преимуществом так же являются небольшие габариты и вес установки. Недостатком является сложность и высокая технологичность принтеров, следовательно, и их дороговизна.

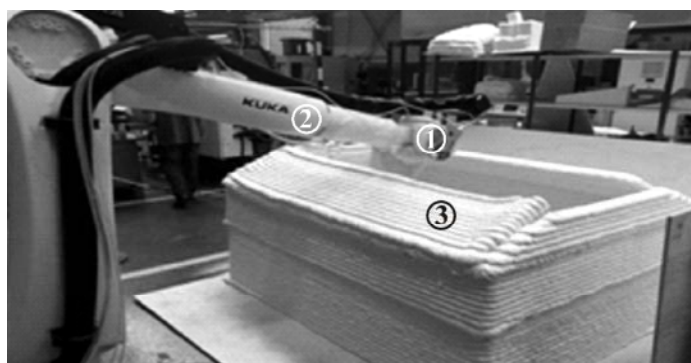


Рис. 5. Строительный 3D-принтер на базе промышленного манипулятора:  
1 – печатающий оголовок; 2 – механическая рука; 3 – изготавливаемая ограждающая конструкция

Выполненный обзор видов строительных 3D-принтеров работающих методом послойного экструдирования свидетельствует, что на сегодняшний день наиболее подходящим по своим характеристикам для возведения малоэтажных зданий является принтер с порталным приводом. В перспективе реализации проектов, с количеством этажей более двух, наиболее подходящим выглядит принтер Aris Cor, работающий в угловых координатах.

### Конструкции стен, возведенных методом послойного экструдирования

Как и любая другая стена возведенная традиционным способом, ограждающая конструкция, напечатанная с помощью 3D-принтера, должна иметь хорошие прочностные и теплоизоляционные качества. Главным преимуществом зданий и сооружений, возведенных методом послойного экструдирования, являются сложные геометрические формы стен.

Конструктив стен в плане чаще всего напоминает пространственную ферму, состоящую из напечатанных внутреннего (несущего), наружного слоев, далее между ними возводится внутренняя часть конструкции в виде треугольников, выполняющая роль ребер жесткости (рис. 6). Для армирования в состав «строительных чернил» можно вводить дисперсную арматуру (фибры), либо укладывать арматурные стержни или кладочную сетку между слоями. Вопрос вертикального армирования решается установкой стержневой арматуры в пустоты, с их дальнейшим заполнением материалом, с низким коэффициентом теплопроводности. Кроме того пустоты стен можно использовать для прокладки различных коммуникаций, либо проектировать форму стен таким образом, что бы на выходе иметь каналы или полости во внутреннем слое для дальнейшего их заполнения элементами водопровода, канализации, электричества и др.

Значительно сократив сроки и затраты труда при возведении стен, 3D-принтер способен изготовить качественную ограждающую конструкцию с высокими прочностными и теплоизоляционными качествами [19].

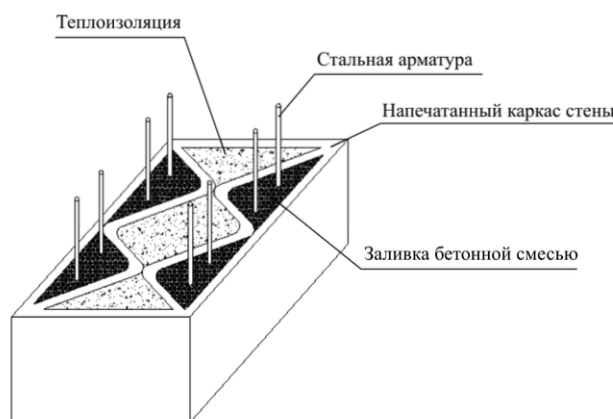


Рис. 6. Конструкция стены, выполненная с помощью 3D-принтера

### Требования к материалам, используемым в качестве «чернил» для строительной 3D-печати методом послойного экструдирования

Немаловажную роль в технологии строительной 3D-печати играет состав строительных «чернил» (сырьевой смеси). Ее основой могут быть такие материалы как портландцемент, гипс, смешанные вяжущие модифицированные активными минеральными и химическими добавками – цементно-волоконистые (фиброцементные), гипсоволоконистые, гипсоцементно-волоконистые и др. [20-26]. Для возможности бездефектной послойной укладки «чернил», сырьевая смесь должна обладать относительно быстрым набором прочности при замедленной кинетике начального структурообразования. Кроме того, сырьевая смесь должна обладать тиксотропными и адгезионными свойствами, быть удобоукладываемой принтером и в то же время не растекаться под воздействием последующих слоев и иметь невысокие усадочные деформации при твердении [27-29]. Известно применение пескобетона марки М300 в качестве «чернил» при изготовлении малых архитектурных форм методом послойного экструдирования [2].

Дисперсное армирование сырьевых смесей «строительных чернил» позволяет повысить физико-механические характеристики затвердевшего композита, снизить величину усадочных деформаций, повысить трещиностойкость и др. Ведение активных минеральных и химических добавок позволяет регулировать реологические свойства смесей используемых в качестве «строительных чернил», эксплуатационные характеристики готовых изделий.

Следует отметить актуальность исследований направленных на разработку составов строительных «чернил» для 3D-принтеров обеспечивающих высокие технологические, эксплуатационные свойства и долговечность.

### **Выводы**

По результатам анализа отечественного и зарубежного опыта аддитивной технологии возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера следует отметить основной недостаток – возможность возведения только вертикальных конструкций в ограниченной рабочей зоне. Кроме того, установка строительного 3D-принтера в рабочее положение и его калибровка требует определенных затрат на подготовительный период.

Несомненными преимуществами аддитивной технологии является снижение трудоемкости работ, риска производственного травматизма, повышение автоматизации и скорости строительства, снижение отходов производства.

Отсутствие нормативной базы для проектирования и строительства зданий с помощью данной технологии не является на данный момент существенным препятствием на пути реализации сложных проектов в связи с необходимостью повышения качества получаемой строительной продукции по данной технологии и расширением ее возможностей.

Успешное развитие аддитивной технологии возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера требует комплексных исследований направленных на разработку эффективных «строительных чернил» на различной основе, изучение их структуры и свойств.

### **Список библиографических ссылок**

1. Атлас новых профессий. URL: <http://atlas100.ru/catalog/stroitelstvo/> (дата обращения: 15.10.2017).
2. Доклад генерального директора ООО «СПЕЦАВИА» (Ярославль) Маслова А. В. на Дне открытых дверей Центра трансфера технологий в капитальном строительстве объектов использования атомной энергии Госкорпорации «Росатом» от 04.10.2017 г. в Технопарке «Сколково» (Москва).
3. Аддитивные технологии и аддитивное производство. URL: [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) (дата обращения: 10.10.2017).
4. Charles W. Hull – Patent US4575330 A. «Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography» 11 March, 1986.
5. История 3D-печати. URL: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/istorija-3d-pechat/> (дата обращения: 15.10.2017).
6. Scott S. Crump – Patent US5121329 A – «Apparatus and method for creating three-dimensional objects». 30 October, 1989.
7. История 3D-принтеров. URL: [http://kanzoboz.ru/article/istoriya\\_3D\\_printerov/](http://kanzoboz.ru/article/istoriya_3D_printerov/) (дата обращения: 16.10.2017).
8. Shanghai WinSun. URL: <http://www.chinawinsun.com/en/> (дата обращения: 20.10.2017).
9. Обзорная статья по 3D-строительным технологиям // URL: <http://geektimes.ru/post/224299> (дата обращения: 21.10.2017).
10. Малышева В. Л., Красимилова С. С. Лазерная стереолитография – новый подход к строительству сооружений // Журнал магистров ПНИПУ. 2013. № 2. С. 202–208.
11. Энциклопедия 3D-печати. Аддитивные технологии. URL: [http://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technolog](http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technolog) (дата обращения: 16.10.2017).
12. Компания Winsun. 3D-проектирование домов. URL: <http://www.yhbm.com/index.php?a=lists&c=index&catid=67&m=content> (дата обращения: 20.10.2017).
13. Contour Crafting technology. URL: <http://contourcrafting.com> (дата обращения: 21.10.2017).
14. Contour Crafting a potential revolution in the construction industry // International Journal of Research in Advent Technology (E-ISSN: 2321-9637) Special Issue National Conference «VishwaCon'16». 2016. P. 22–26.
15. Портальные 3D-принтеры. URL: <http://specavia.pro/articls/Stroitelnaja-3D-pechat->

- Maloformatnoe-oborudovanie-Prakticheskie-rekomendacii/ (дата обращения: 22.10.2017).
16. Обзор известных проектов 3D-принтеров. URL: <http://spaceexpansion.ucoz.ru/index/0-24> (дата обращения: 15.10.2017).
  17. Журнал Apis Cor technology description – We print buildings. URL: <http://apis-cor.com/3d-printer> (дата обращения: 10.10.2017).
  18. Мобильный строительный 3D-принтер Apis Cor. URL: <http://apis-cor.com/3d-printer> (дата обращения: 19.10.2017).
  19. Белов А. О., Гилязидинов Н. В. Технология возведения малоэтажных зданий с помощью 3D-принтера: сб. ст. VII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием / КузГТУ ИМ. Т.Ф. Горбачева. г. Кемерово, 2015. С. 703.
  20. Торшин А. О., Потапова Е. Н. Перспективы использования 3D-принтера в строительстве // Успехи химии и химической технологии. ТОМ XXX. 2016. № 7. С. 118.
  21. Изотов В. С., Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р. Влияние полипропиленовых волокон на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 135–137.
  22. Изотов В. С., Мухаметрахимов Р. Х., Сабитов Л. С Цементно-волоконный композиционный материал для фиброцементных плит // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 20–21.
  23. Мухаметрахимов Р. Х., Изотов В. С. Повышение физико-механических свойств и долговечности фиброцементных плит на основе целлюлозных волокон // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 9 (645). С. 101–107.
  24. Мухаметрахимов Р. Х., Изотов В. С., Гревцев В. А. Фиброцементные плиты на основе модифицированного смешанного вяжущего // Известия КГАСУ 2010. № 2 (14). С. 250–254.
  25. Мухаметрахимов Р. Х., Изотов В. С. Влияние активных минеральных добавок на гидратацию вяжущего и физико-механические свойства фиброцементных плит // Известия КГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 213–217.
  26. Халиуллин М. И., Алтыкис М. Г., Рахимов Р. З. Эффективные сухие гипсовые смеси с добавками полимерных волокон // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 3. С. 33–37.
  27. Удодов С. А., Белов Ф. А., Золотухина А. Е. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей : сб. ст. VI Международной научно-практической конференции МЦНС – Наука и просвещение». Пенза, 2017. С. 58–62.
  28. Austin S. A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe T. // Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / Materials and Structures. 2012. P. 1221–1232.
  29. Wang Yo., Wu H. C., Li V. C. Concrete reinforcement with recycled fibers // Journal of Materials in Civil Engineering. 2000. № 4-12. P. 314–319.

**Mukhametrakhimov R.Kh.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

**Vakhitov I.M.** – engineer

E-mail: vakhitovim@gmail.com

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Additive technology of erection of buildings and structures using building 3D-printer**

#### **Abstract**

*Problem statement.* Innovative technologies are being introduced almost in every sector of human activity, however, one such major industries as construction and manufacturing, today

is characterized by high labor costs and is the least automated. The transition from classical technologies of erection of buildings to additive construction using 3D-printing may be the solution to this problem. In real time construction 3D-printers are being actively implemented in the construction manufacture in China, USA and the Netherlands. Against the background of rapidly developing in this area countries, Russia is not an outsider and today it has in its number a number of organizations are developing and producing their products 3D-printers («Spetsavia», Yaroslavl, «ApisCor», Moscow).

*Results.* In this article the analysis of additive technology erection of buildings and structures, as the problem of low automation of construction industry. The history of development, methods of 3D-printing and building 3D-printers. This brief description of the design and materials used when printing envelopes.

*Conclusions.* The main results of the study are to analyze the shortcomings and advantages of additive technology of construction of buildings and structures, and identifying its prospects. The significance of the results for the construction industry is to increase the automated processes on the construction site, reducing human labor and reducing accidents.

**Keywords:** additive technologies, building a 3D-printer, 3D-printing, technology of erection of buildings and structures, construction and production.

### References

1. The Atlas of new professions. URL: <http://atlas100.ru/catalog/stroitelstvo/> (reference date: 15.10.2017).
2. Report of the General Director of «SPETSAVIA» (Yaroslavl) Maslov A. V. at the open Day of the Centre for technology transfer in capital construction objects of use of atomic energy «Rosatom» from 04.10.2017 in Technopark «SKOLKOVO» (Moscow).
3. Additive technology and additive manufacturing. URL: [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) (reference date: 10.10.2017).
4. The Charles W. US4575330 a Paten – Apparatus for production of threedimensional objects by stereolithography, March 11, 1986.
5. The story of 3D-printing. URL: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/istorija-3d-pechati> (reference date: 15.10.2017).
6. Scott S. Crump. patent US5121329 a – apparatus and method for creating three-dimensional objects, October 30, 1989.
7. The story of 3D-printers. URL: [http://kanzoboz.ru/article/istoriya\\_3D\\_printerov/](http://kanzoboz.ru/article/istoriya_3D_printerov/) (reference date: 16.10.2017).
8. Shanghai winsun. URL: <http://www.chinawinsun.com/en/> (reference date: 20.10.2017).
9. Review of the 3D construction technologies. URL: <http://geektimes.ru/post/224299> (reference date: 21.10.2017).
10. Malysheva V. L., Krasimirova S. S. Laser stereolithography – a new approach to the construction of buildings // Zhurnal magistriv PNIPU. 2013. № 2. P. 202–208.
11. Encyclopedia 3D-printing. Additive technologies. URL: [http://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technolog](http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technolog) (reference date: 16.10.2017).
12. The Company Winsun. 3D-design of houses. URL: <http://www.yhbm.com/index.php?a=lists&c=index&catid=67&m=content> (reference date: 20.10.2017).
13. Contour Crafting technologies. URL: <http://contourcrafting.com> (reference date: 21.10.2017).
14. Contour craft a Potential revolution in the construction industry // international research journal of advent Technology (E-ISSN: 2321-9637) Special issue national conference «VishwaCon'16». 2016. P. 22–26.
15. Gantry 3D-printers. URL: <http://specavia.pro/articls/Stroitel'naja-3D-pechat-Maloformatnoe-oborudovanie-Prakticheskie-rekomendacii/> (reference date: 22.10.2017).
16. The review of known projects 3D-printers. URL: <http://spaceexpansion.ucoz.ru/index/0-24> (reference date: 15.10.2017).
17. Description of the technology Apis Cor – We print the building. URL: <http://apis-cor.com/3d-printer> (reference date: 10.10.2017).

18. Mobile construction 3D-printer KOR APIs. URL: <http://apis-cor.com/3d-printer> (reference date: 19.10.2017).
19. Belov A. O., Gilyazetdinov N. In. The technology of erection of low-rise buildings using 3D printer: collection of articles VII all-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation / KuzGTU THEM. T. F. Gorbachev Kemerovo, 2015. P. 703.
20. Torshin A. O., Potapova Ye. N. Prospects for using a 3D printer in construction // Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii. TOM XXX. 2016. № 7. P. 118.
21. Izotov V. S., Mukhametrakhimov R. Kh., Galiautdinov A. R. Influence of polypropylene fibers on the main properties of gypsum cement-pozzolanic binder // Vestnik KTU. 2015. V. 18. № 1. P. 135–137.
22. Izotov V. S., Mukhametrakhimov R. Kh., Sabitov L. S. Cement-fiber composite material for fiber-cement slabs // Stroitelnye materialy. 2011. № 5. P. 20–21.
23. Mukhametrakhimov R. Kh., Izotov V. S. Increase of physical and mechanical properties and durability of fiber-cement slabs on the basis of cellulose fibers // Izvestiya VUZov. Stroitelstvo. 2012. № 9 (645). P. 101–107.
24. Mukhametrakhimov R. Kh., Izotov V. S., Grevcev V. A. Fiber cement slabs based on modified mixed binder // Izvestiya KGASU. 2010. № 2 (14). P. 250–254.
25. Mukhametrakhimov R. Kh., Izotov V. S. Influence of active mineral additives on the hydration of binders and physical and mechanical properties of cement boards // Izvestiya KGASU. 2011. № 2 (16). P. 213–217.
26. Khaliullin M. I., Altykis M. G., Rakhimov R. Z. Effective dry gypsum mixtures with additives of polymer fibers // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2004. № 3. P. 33–37.
27. Udodov S. A., Belov A. F., Zolotukhin A. E. 3D-printing in construction: a new direction in the technology of concrete and dry mixes : dig. of art. VI International scientific-practical conference – Nauka i prosveshchenie. Penza, 2017. P. 58–62.
28. Austin S. A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A. G. F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. P. 1221–1232.
29. Van Yo., Wu H. K., Lee V. S., concrete reinforcement with recycled fibers // Journal of materials in civil engineering. 2000. № 4–12. P. 314–319.

УДК 69.05

**Мухаметрахимов Р.Х.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Панченко А.А.** – инженер ПТО

**ООО «Инжстрой»**

Адрес организации: 420034, Россия, г. Казань, ул. Ленская, д. 10

### **Особенности системы контроля качества при строительстве наружных сетей водоснабжения и канализации**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Монтаж систем наружных сетей водоснабжения и канализации (НВК) сложный, трудоемкий процесс от качества, выполнения которого зависит бесперебойное хозяйственно-питьевое и противопожарное водоснабжение и канализационный отвод. Цель исследований – изучить особенности системы контроля качества при строительстве наружных сетей водоснабжения и канализации (НВК).

*Результаты.* В статье рассматривается роль каждого этапа контроля качества при монтаже сетей НВК. На первом рассмотрено влияние подготовительных работ на качество получаемой строительной продукции. На втором этапе изучены работы основного периода: земляные работы, устройство песчаного основания, монтаж трубопроводов, обратная засыпка. На третьем этапе приводятся требования к приемочному контролю построенной сети НВК.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в уточнении особенностей системы контроля качества при строительстве сетей НВК. Изучены зависимости характерных дефектов и повреждений сетей НВК, показаны причины и роль строительного контроля при их возникновении.

**Ключевые слова:** наружные сети водоснабжения и канализации, организация и технология строительства, монтаж, контроль качества.

#### **Введение**

Получение качественной строительной продукции в виде готовых к эксплуатации сетей НВК требует соблюдения технологии производства строительно-монтажных работ (СМР) достигаемых обеспечением системы контроля качества на каждом его этапе [1-6]. Одними из важных этапов при этом является качественная защита трубопроводов от коррозии с целью обеспечения их надежности и долговечности [6], а также повышение физико-механических свойств и долговечности строительных изделий [8]. Контроль качества состоит в получении фактических данных применяемых строительных материалов, изделий, конструкций, их положении в пространстве, закреплении [9] и др. и сравнении этих данных с заданными проектными характеристиками. Объектом контроля является как сама строительная продукция, так и процессы ее создания, эксплуатации, транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также ведение соответствующей документации.

Объектом исследований являются процессы строительства сетей НВК. Цель работы – изучить технологию особенности системы контроля качества при монтаже сетей НВК. Актуальность темы обусловлена тем, что качественное выполнение работ является залогом длительной и безаварийной службы построенных сетей водоснабжения и канализации.

Основные требования к сооружениям инженерных сетей изложены в нормативных документах: СП 32.13330.2012, СНиП 3.05.04-85\*, СП 126.1330.2012, СП 45.13330.2017, СП 86.13330.2014. Отступление от требований нормативной документации часто приводит к аварийным ситуациям в процессе эксплуатации. В этой связи в работе рассматривается роль каждого этапа контроля качества при монтаже НВК.



### **Подготовительный период**

Подготовительные работы при монтаже сетей НВК включают в себя создание геодезической разбивочной основы на стройплощадке; разбивку и закрепление осей и точек на местности с установкой дополнительных реперов; передачу проектно-сметной документации (ПСД) подрядной организации; выполнение водоотвода и расчистку территории.

Подрядная организация при приемке ПСД обязана произвести ее контроль – проверить комплектность, установить соответствие требованиям технического задания и требованиям нормативной документации, например ГОСТ 21.001-2013 «Система проектной документации для строительства (СПДС). Общие положения» и др. При приёмке рабочих чертежей проверяют: комплектность чертежей, спецификаций, дополнений к проекту; соблюдение договорных сроков разработки и предоставления чертежей; наличие согласований ПСД с заказчиком по видам работ; выполнение чертежей в соответствии с требованиями системы проектной документации для строительства; соответствие ПСД монтажно-технологическим и техническим решениям, принятым заказчиком. При приемке сметной документации проверяют полноту сметного обеспечения проекта; соответствие сметных объемов и объемов, указанных в рабочих чертежах; правильность определения стоимости работ и услуг; полноту и обоснованность применения поправочных коэффициентов на местные условия работы. Внутренний и внешний контроль качества проектной документации является важной составляющей в обеспечении качества проектной, а затем и строительной продукции [10, 11].

Кроме того, в ходе подготовительного периода производят геодезический контроль точности геометрических параметров разбивочных работ в соответствии с СП 126.13330.2012 «Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84»: точность построения разбивочной сети строительной площадки для выноса в натуру сооружений; правильность закрепление пунктов геодезической разбивочной основы с требованиями ППГР правильность места закладки геодезических знаков с отметками на генпланах, стройгенпланах ПОС, чертежах ППГР [12].

### **Основной период**

В состав работ по устройству сетей НВК входят земляные работы, устройство песчаного основания, монтаж трубопроводов, засыпка траншеи с послойной трамбовкой.

Земляные работы по устройству траншеи заключаются в разработке грунта экскаватором с доработкой до проектных отметок вручную. Производство работ, связанных с нахождением работников в выемках с откосами без креплений допускается при глубине выемки и крутизне откосов указанных в СНиП 12-04-2002 «Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство». Необходимость временного крепления вертикальных стенок траншеи устанавливается в зависимости от глубины, вида и состояния грунта, гидрогеологических условий, величины и характера временных нагрузок на бровке и указывается в проекте производства работ.

Требования к составу операций и средствам контроля земляных работ при монтаже сетей НВК составленные на основе СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87», приведены в табл. 1.

Песчаное основание под трубопроводы следует выполнять вне зависимости от вида грунтов. Толщина слоя песчаной подушки указывается в проекте, за 2 метра до смотрового колодца или до стенки колодца со стороны входной трубы песчаное основание должно быть уплотнено. Подушка под трубопроводы должна быть тщательно выровнена, в местах выполнения стыковых соединений предусматриваются приямки.

При отсутствии необходимости устройства выравнивающей подушки, например, в грунтах с большим внутренним трением, когда дно траншеи под трубу выполнено ровным, рекомендуется произвести незначительную выемку грунта в основании по ширине трубы и заменить его на более мягкий. При этом извлеченный грунт допускается использовать для первичной обсыпки трубы. Грунт, используемый для обсыпки при необходимости его уплотнения в соответствии с требованиями проекта должен быть пригоден для такой операции. При непригодности извлеченного грунта для обсыпки трубы, следует использовать песок или гравий с размером фракций 22 мм или щебень с

размером фракций 4-22 мм. Коэффициент уплотнения выполняют в соответствии с требованиями проекта. Первичную обсыпку труб следует производить по всей ширине траншеи на высоту не менее 0,15 м от верха трубы.

Таблица 1

### Состав операций и средства контроля земляных работ при монтаже сетей НВК

Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Земляные работы: разработка котлована экскаватором с доработкой вручную	Проверить:		Общий журнал работ Акт освидетельствования скрытых работ Протокола, заключения о лабораторных исследованиях
	-отклонение отметок дна траншей;	Измерительный	
	-минимальная ширина траншей;	Измерительный	
	-уклоны дна траншей;	Измерительный	
	-ширину траншей;	Измерительный	
	-крутизну откосов.	Измерительный	
	-выемки с откосами, подвергшимся увлажнению, состояние грунта откосов и обрушение неустойчивого грунта в местах, где обнаружены «kozyрьки» или трещины (отслоения);	Визуальный	
-качество грунтов основания.	Лабораторный		
Контрольно-измерительный инструмент: нивелир, рулетка, шаблон крутизны откосов, лабораторные инструменты.			
Операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), геодезист – в процессе работ, лаборатория.			
Приемочный контроль осуществляют: работники службы качества, мастер (прораб), геодезист, представители технадзора заказчика			

Контроль качества производства работ по укладке грунта и его уплотнению производят ответственный производитель работ, работники лаборатории грунтов. Для установления состава и плотности грунтов отбор проб следует выполнять из шурфов на глубине не менее 0,5 м по сетке, разбиваемой в зависимости от литологического состава пород [13].

Состав операций и средства контроля работ по устройству основания при монтаже сетей НВК приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Состав операций и средства контроля работ по устройству основания при монтаже сетей НВК

Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Устройство песчаного основания	Проверить:		Общий журнал. Журнал контроля за уплотнением грунта. Акт освидетельствования скрытых работ. Протокола, заключения о лабораторных исследованиях
	- соответствие высоты основание проектный;	Измерительный	
	-достаточность уплотнения песчаного основания с проектом;	Лабораторный	
Контрольно-измерительный инструмент: нивелир, рулетка, лабораторные инструменты.			
Операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), лаборантом.			
Приемочный контроль осуществляют: работники службы качества, мастер (прораб), геодезист, представители технадзора заказчика			

Монтаж трубопроводов. Монтаж труб, фасонных частей, компенсаторов, запорной арматуры входит в состав работ по монтажу НВК. На сегодняшний день для уменьшения сроков строительства, прокладка трубопровода предусматривает централизованную заготовку монтажных элементов и узлов, доставку их в готовом виде. Состав и последовательность рабочих процессов при прокладке трубопроводов зависят от типа применяемых труб – стальных или полиэтиленовых, гладких или гофрированных, а также от условий монтажа – в стесненных городских или полевых, на ровной или пересеченной местности, при наличии перепадов высот.

Работы при прокладке трубопроводов обычно осуществляют в несколько этапов, выполняемых последовательно. Состав операций и средства контроля при монтаже трубопроводов сетей НВК приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Состав операций и средства контроля при монтаже трубопроводов сетей НВК

Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Монтаж трубопроводов	Проверить:		Паспорта, сертификаты, заключения. Журнал входного контроля. Общий журнал работ. Журнал сварочных работ. Журнал антикоррозионной защиты. Акт приемки выполненных работ, акт освидетельствования скрытых работ, акт испытания трубопроводов.
	-наличие документа о качестве на все материалы, поставляемые на строительную площадку;	Визуальный	
	-готовность траншеи, наличие основание соответствующего основания перед монтажом труб;	Визуальный	
	-качество монтажа труб: проектные уклоны;	Измерительный	
	-соосность и прямолинейность труб;	Измерительный	
	-правильность укладки трубопровода согласно проекту;	Измерительный	
	-соблюдение технологии монтажа и выполнения уплотнения и герметизации стыковых соединений;	Измерительный	
	-сварные соединения трубопроводов;	Визуальный Измерительный	
	- испытание трубопроводов на прочность и герметичность, на пролив и тп.	Измерительный	
Контрольно-измерительный инструмент: нивелир; линейка; уровень; дефектоскоп, толщиномер.			
Входной и операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), геодезист, лаборант			
Приемочный контроль осуществляют: работники службы качества, мастер (прораб), представители технадзора заказчика.			

Засыпка траншеи. Обратная засыпка траншеи грунтом выполняется после проведения испытания трубопровода на прочность и герметичность, составления актов на скрытые работы и о проведении гидравлического (пневматического) испытания на прочность и герметичность напорного (безнапорного) трубопровода. Комиссия, осуществляющая контроль и дающая разрешение на обратную засыпку включает представителей заказчика, проектной организации, подрядчика.

Таблица 4  
Состав операций и средства контроля обратной засыпки смонтированных сетей НВК

Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Обратная засыпка траншей	Проверить:		Общий журнал работ, акт освидетельствования скрытых работ, акт приемки выполненных работ
	- грунт для обратной засыпки на наличие включений;	Визуальный	
	- соответствие физико-механических характеристик отсыпаемого и уплотненного грунта требованиям проекта.	Лабораторный	
Контрольно-измерительный инструмент: нивелир, линейка, лабораторные инструменты			
Входной и операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), лаборатория.			
Приемочный контроль осуществляют: работники службы качества, мастер (прораб), представители технадзора заказчика.			

Засыпка траншей с уложенными трубопроводами и с непроходными каналами производится в две стадии. Допускается не уплотнять грунт обратной засыпки траншей, которые воспринимают только собственный вес, при этом следует отсыпать валик вдоль трасы траншеи. Размеры валика должны быть определены с учетом естественной осадки грунта. В верхних зонах траншей и в обратных засыпках пазух котлована зданий и сооружений допустимо содержание мерзлых комьев в количестве не более 20 % от общего объема грунта. Твердые включения, в том числе мерзлые комья, должны быть не более 30 см и не должны превышать объем в 2/3 толщины уплотненного слоя.

Отклонения гранулометрического состава грунта допускаются не более чем в 20 % определений. Не допускается содержания в грунте разлагаемых органических материалов, легкосжимаемого строительного мусора.

Состав операций при обратной засыпке и средства контроля приведены в табл. 4.

### Приемочный контроль

После обратной засыпки трубопровода производится приемочный контроль сети водоснабжения или канализации, который заключается в гидравлическом (пневматическом) приемочном испытании трубопроводов на прочность и герметичность напорного (безнапорного) трубопровода соответствии с требованиями СНиП 3.05.04-85\* «Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации (с изменениями)».

После выполнения всех работ, проведения приемочных испытаний и заполнения соответствующих актов, происходит доработка исполнительной документации (ИД) в соответствии с требованиями регламента заказчика о ведении и приемки-передачи исполнительно-технической документации. Основные требования к исполнительной документации изложены в СП 48.13330.2011 «Организация строительства» и СНиП 3.05.04-85 «Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации (с изменениями)».

При передаче подрядчиком исполнительной документации, производится ее контроль со стороны заказчика за соблюдением правильности и полноты исполнительной документации. Проверяется наличие всех схем с фактическими отметками, наличие паспортов, сертификатов, документов о соответствии на все материалы, примененные при строительстве, наличие подписанных актов освидетельствования скрытых работ и других актов, заполняющихся при строительстве. Средства контроля приемочного этапа при монтаже сетей НВК приведены в табл. 5.

Таблица 5

### Средства контроля приемочного этапа при монтаже НВК

Этапы работ	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Приемочный этап	Проверить: - готовность смонтированных сетей НВК к работе;	Визуальный Измерительный	Готовая исполнительная документация
	- наличие, полнота и правильность ИД согласно требованиям регламента заказчика.	Визуальный	

На следующем этапе рассмотрены наиболее характерные дефекты и повреждения возникающие при строительстве или в процессе эксплуатации сетей НВК на основании опыта работ по их восстановлению компанией ООО «Инжстрой», г. Казань (табл. 6).

Таблица 6

### Характерные дефекты и повреждения возникающие при строительстве и эксплуатации сетей НВК и причины их возникновения

Наименование дефектов и повреждений	Причины возникновения
Разрыв трубопровода при благоустройстве	Дефект строительства. Не соответствие данных содержащихся в исполнительной документации
Просадка грунта, провалы асфальто-бетонного покрытия	Дефект строительства. Не произведено уплотнение грунта в соответствии с проектом
Протечка в месте соединения труб и фасонных частей	Дефект строительства. Нарушение технологии сварочных работ. Отсутствие визуального и измерительного контроля
Протечка запорной арматуры	Не соответствующее качество запорной арматуры и уплотнительной прокладки. Отсутствие входного контроля
Деформация (смятие) ПЭ трубы на локальных участках, образование трещин	Дефект строительства. Не достаточное уплотнение песчаного основания, песчаной подбивки и обратной засыпки. Ошибка проектирования, не правильно выбрано SDR трубы
Застой воды в канализационном колодце	Дефект строительства. Не соблюдены проектные уклоны
Затруднение или невозможность обслуживания колодцев	Ошибка проектирования. Запроектирована малая высота рабочей части и большая высота горловины колодца
Разрушение опорных и стеновых колец	Ошибка проектирования. Под дорогой с интенсивным движением запроектировано кольцо опорное КОБ вместо плиты дорожной ПДб
Не исправность в работе канализации, перелив колодца	Ошибка проектирования. Не правильно запроектирован диаметр канализации. Диаметр канализации по ходу движения воды идет на уменьшение
Сложность ремонта участка сети трубопровода под ж/д или автодорогой	Ошибка проектирования. Не запроектирован футляр

Как видно, одним из наиболее характерных дефектов при строительстве сетей НВК является несоответствие фактические выполненных работ проектным данным (координатам сетей, высотным отметкам, длинам), что приводит к повреждениям при выполнении других работ, например по благоустройству территории или при прокладке других коммуникаций. Следует отметить, что данные приведенные в исполнительной документации при этом не соответствуют действительности, что приводит к затруднению выявления причин аварий и существенно удорожает стоимость восстановительных работ.

### Выводы

Таким образом, в работе рассмотрены особенности системы контроля качества при строительстве наружных сетей водоснабжения и канализации. На первом этапе показана важность подготовительных работ в обеспечении нормативного уровня качества. На втором этапе приведены наиболее значимые данные по контролю качества и приемке работ основного периода строительства – земляных работ, устройства оснований, монтажа трубопроводов и обратной засыпке. На третьем этапе систематизированы данные дефектов и повреждений, возникающих при строительстве и эксплуатации сетей НВК, указаны причины их возникновения. Установлено, что причиной многочисленных дефектов являются существенные отклонения отметок дна траншеи, их уклоны и несоблюдение требований при обратной засыпке. Показано, что несоблюдение требований приемочного контроля со стороны заказчика, несоответствие исполнительных схем и натуральных данных приводит к затруднению выявления причин аварий и существенно удорожает стоимость восстановительных работ.

### Список библиографических ссылок

1. Гроссе К. У. Неразрушающий контроль и технология мониторинга технического состояния конструкций при контроле качества и надзоре за объектами строительства // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2012. № 6. С. 62–77.
2. Гимадетдинов М. К. Строительный контроль как основной элемент системы управления качеством строительной продукции : сб. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительством / Самарский государственный технический университет. Самара, 2017. С. 325–327.
3. Jogo alencastro, alba fuertes, pieter de wilde. the relationship between quality defects and the thermal performance of buildings. review article // Renewable and sustainable energy reviews. 2018. Vol. 81. P. 1. P. 883–894.
4. Carla Cherchi, Mohammad Badruzzaman, Joan Oppenheimer, Christopher. M. : Bros, Joseph G. JAcAngelo. The relAtionship between quAlity defects And the thermAl performAnce of buildings. Energy And water quality management systems for wAtEr utility's operAtions: A review. Review Article // JournAl of EnvironmentAl MAnAgement. 2015. Vol. 153. P. 108–120.
5. Irene KArAthAnAsi, ConstAntinos PApAgeorgAkopoulos. Development of A LeAkAge Control System At the WAtEr Supply Network of the City of PAtRAs: originAl reseArch Article // ProcediA Engineering. 2016. Vol. 162. P. 553–558.
6. Коклюгина Л. А., Коклюгин А. В. Определение продолжительности строительства объектов нефтеперерабатывающей промышленности с учетом интересов участников инвестиционного строительного проекта // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 20. С. 290–292.
7. Строганов В. Ф., Строганов И. В., Ахметшин А. С., Стоянов О. В., Старостина И.А. Эпоксиполимерные адгезионные праймеры в антикоррозионной изоляции трубопроводов // Известия КГАСУ. 2010. № 1 (13). С. 342–346.
8. Мухаметрахимов Р. Х., Изотов В. С. Повышение физико-механических свойств и долговечности фиброцементных плит на основе целлюлозных волокон // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 9 (645). С. 101–107.
9. Гиря Л. В., Белаш В. В., Хоренков С. В., Петров К. С. Контроль качества производства работ по закреплению грунтов основания с использованием метода

- георадиолокационного подповерхностного зондирования // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 27. № 4. С. 148.
10. Киселева К. И. Система контроля качества проектной документации как составляющая часть системы менеджмента качества проектной организации : сб. Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития – материалы Всероссийской научно-практической онлайн-конференции с международным участием и элементами научной школы для молодежи / Байкальский государственный университет экономики и права. 2014. С. 188–196.
  11. Горячев И. Е. Государственная экспертиза – действенный инструмент контроля качества проектной документации для строительного комплекса Московской области // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 7. С. 12–13.
  12. Смородинов М. И. Справочник по общестроительным работам. Основания и фундаменты. М. : Стройиздат, 1974, 372 с.
  13. Ланге Б. С. Разработка методологии комплексной оценки качества магистральных трубопроводов в процессе строительного контроля. М. : РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012.

**Mukhametrakhimov R.Kh.** – candidate of technical sciences, associate professor  
E-mail: muhametrahimov@mail.ru

**Kazan State University Of Architecture And Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Panchenko A.A.** – engineer of production and technical department

**LTD «Ingstroy»**

The organization address: 4200343, Russia, Kazan, Lenskaya st., 10

### **Features of the quality control system for the construction of outdoor water supply and sewerage networks**

#### **Abstract**

*Problem statement.* Installation of outdoor water supply systems and sewerage networks is a complex, time-consuming process, its quality influences on the operation of drinking supply and fire water line and sewerage. The purpose of the research is study the features of the quality control system in the construction of outdoor water supply systems and sewerage networks.

*Results.* The article examines the role of each stage of quality control in the installation of outdoor water supply systems and sewerage networks. At the first stage, the influence of preparatory works on the quality of the received construction products is considered. At the second stage, the works of the main period were studied: excavation, installation of sand base, installation of pipelines, backfilling. At the third stage, we studied the requirements for acceptance control of outdoor water supply systems and sewerage networks.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is to clarify the features of the quality control system for the construction of outdoor water supply systems and sewerage networks. Dependences of characteristic defects and damages of outdoor water supply systems and sewerage networks are studied; the causes and role of construction control are shown when they arise.

**Keywords:** outdoor water supply systems and sewerage networks, organization And technology of construction, installation, quality control.

#### **References**

1. Grosse K. W. Non-destructive testing and technology monitoring of the technical condition of structures in the control of quality and supervision of buildings // ALITinform: Tsement. Beton. Sukhiye smesi. 2012. № 6. P. 62–77.

2. Gimadetdinov M. K. Construction control as the main element of the quality management system of construction products : coll. Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo / Samara State Technical University. Samara, 2017. P. 325–327.
3. Joro alencastro, alba fuertes, pieter de wilde. the relationship between quality defects and the thermal performance of buildings. review article // Renewable and sustainable energy reviews. 2018. Vol. 81. P. 1. P. 883–894.
4. Carla Cherchi, Mohammad Badruzzaman, Joan Oppenheimer, Christopher. M. : Bros, Joseph G. Jacangelo. The relationship between quality defects And the thermal performance of buildings. Energy and water quality management systems for water utility's operAtions: A review. Review Article // Journal of Environmental management. 2015. Vol. 153. P. 108–120.
5. Irene Karathanasi, ConstAntinos Papageorgakopoulos. Development of A Leakage Control System at the Water Supply Network of the City of Patras: original research Article // Procedia Engineering. 2016. Vol. 162. P. 553–558.
6. Koklyugina L. A., Koklyugin A. V. Determination of the duration of construction of oil refining facilities taking into account the interests of the participants of the investment construction project // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. V. 17. № 20. P. 290–292.
7. Stroganov V. F., Stroganov I. V., Akhmetshin A. S., Stoyanov O. V., Starostin I. A. Epoxy-polymeric adhesion primers in anti-corrosion insulation of pipelines // Izvesiya KGASU. 2010. № 1 (13). P. 342–346.
8. Mukhammetrahimov R. Kh., Izotov VS Increase of physico-mechanical properties and durability of fiber-cement slabs on the basis of cellulose fibers // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2012. № 9 (645). P. 101–107.
9. Girya L. V., Belash V. V., Khorenkov S. V., Petrov K. S. Quality control of the work on fixing foundation grounds using the method of georadiolocation subsurface sounding // Inzhenernyy vestnik Dona. 2013. V. 27. № 4. P. 148.
10. Kiseleva K. I. A system for controlling the quality of design documentation as the part of the management system for the quality of the project organization: Sat. Problems of economics and management of construction under the conditions of environmentally oriented development – material of All-Russian scientific and practical on-line conference with international education and elements of the scientific school for youth / Baikal State University of economics and law. 2014. P. 188–196.
11. Goryachev I. E. State examination is an effective tool for controlling the quality of design documentation for the construction complex of the Moscow region // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2012. № 7. P. 12–13.
12. Smorodinov M. I. Masterplanner for general construction. Foundations and Fundament. M. : Stroiizdat, 1974, 372 p.
13. Lange B. S. Development of a methodology for the integrated assessment of the quality of main pipelines in the process of construction control. M. : RSU of oil and gas after I. M. : Gubkin, 2012.

УДК 614.8.084:699.887

**Хузиахметов Р.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [hroustam@mail.ru](mailto:hroustam@mail.ru)

**Сахапов Р.Л.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [rusakhapov@gmail.com](mailto:rusakhapov@gmail.com)

**Земдиханов М.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [mr.minsur@mail.ru](mailto:mr.minsur@mail.ru)

**Андреева С.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [saandreeva@mail.ru](mailto:saandreeva@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Расчет центра тяжести масс и угла устойчивости в поперечной плоскости сваебойного копра СП-49Д на базе трактора Т-10МБ**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью исследования является установление возможности опрокидывания сваебойного копра вследствие превышения угла наклона строительной площадки на месте производства свайных работ.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в определении причин нарушения требований градостроительного законодательства и нормативно-технической документации, в результате чего произошло опрокидывание копровой установки, завершившееся гибелью машиниста. Основные результаты исследования состоят в расчетном определении центра тяжести масс сваебойного копра и его устойчивости в поперечной плоскости в процессе подготовки свай к забивке и в процессе их забивки.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в необходимости повышения уровня безопасности при выполнении свайных работ и учета реальных условий на строительной площадке в местах их выполнении (например, уклона площадки на месте производства работ). На исследованном строительном объекте уклон строительной площадки не мог быть причиной несчастного случая, так как он не превышал гарантированно безопасной величины – 3°.

**Ключевые слова:** сваебойный копер, травматизм, несчастный случай, уклон строительной площадки, устойчивость в поперечной плоскости, координаты центра тяжести масс, вынос мачты.

#### **Введение**

В настоящей статье является продолжением рассмотрения причин нарушения градостроительного законодательства и требований нормативно-технической документации, приведших к смертельному несчастному случаю.

Исследователями отмечается сохраняющийся на сегодняшний день высокий уровень производственного травматизма в строительной отрасли [1-5], несмотря на осознание необходимости профессионального подхода к проектированию, организации и строительству объектов и обеспечения безопасности всех технологических процессов, проводимых на строительной площадке.

Несмотря на значительные размеры строительной площадки, на которой произошел несчастный случай, условия проведения работ оказались стесненными вследствие совмещения различных производимых строительного-монтажных работ на стадии нулевого цикла:

- недостаточной проработанности в проектно-сметной документации безопасных возможностей выполнения работ в разделах проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР);

- отступления от проектных решений при разработке двухступенчатого котлована;

- нарушений требований безопасности при непосредственном выполнении работ.

В связи с этим отметим острую необходимость проработки вопросов безопасности, начиная со стадии исследования условий места возможного строительства при стесненной городской застройке с разработкой технических решений [6].



В статье [7] была освещена основная причина происшествия – опрокидывание сваебойного копра было вызвано потерей устойчивости откоса грунта и падения установки в расположенный вблизи расположенный котлован. Однако, при проведении экспертного исследования, наряду с другими были организационными и техническими причинами несчастного случая изучены и другие моменты, позволившие сделать основные выводы, приведенные в статье [7].

### Основная часть

Для выполнения сваебойных работ на данной строительной площадке использовалась копровая установка СП-49, заводской номер 311942.

Перед экспертами была поставлена задача расчетного обоснования по выявлению возможного самопроизвольного опрокидывания сваебойной установки СП49 при отклонении от паспортных требований к качеству подготовки площадки, на которой должна работать сваебойная установка.

В результате аварии, на копровой установке СП-49 были серьезно повреждены конструкции мачты, раскосы, молот. Кабина машиниста значительных деформаций не претерпела, кроме некоторых разбитых стекол.

На базовом тракторе внешних повреждений ходовых частей, а также повреждений органов управления (педалей, рычагов, панелей приборов) в кабине при внешнем осмотре не было выявлено. Табличка с читаемым заводским номером копровой установки и годом выпуска (обозначена цифрой «5») размещается в задней нижней части машины на конструкциях рамной части. Повреждений двигателя также не было.

Сваебойный копер после аварии с помощью тяжелого грузоподъемного крана был поднят и уложен на свободное место на строительном участке. После аварии деформированные части копрового оборудования были демонтированы с установки, а базовый трактор вместе с оставшимся недемонтированным копровым оборудованием был доставлен на базу субподрядчика (рис. 1).



Рис. 1. Фотографии копровой установки: а, б – на месте аварии; в, г, д – после демонтажа

На рис. 2 представлены фотографии аналогичной копровой установки СП-49 (из интернета) в транспортном и в рабочем положениях.



Рис. 2. Фотографии копровой установки СП-49:  
а, б, в – в транспортном положении; г – в рабочем положении

При проведении экспертного исследования была изучена техническая документации на использованное сваебойное оборудования, а также информационно-технические материалы на это оборудование и базовую машину: ГОСТ Р 516602-2000<sup>1</sup>, ГОСТ Р 50906-96<sup>2</sup>, ЕНиР Е12<sup>3</sup>, Руководство по эксплуатации<sup>4</sup>, Каталог сборочных единиц<sup>5</sup>, СНиП 12-03-2001<sup>6</sup>.

Основные исходные технические данные для расчета устойчивости представлены в табл. 1. На рис. 3 представлены необходимые для расчета размеры базового трактора Т10МБ.

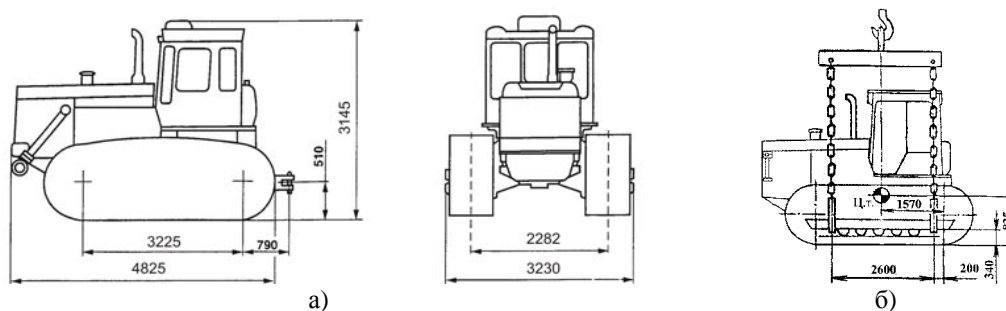


Рис. 3. Габариты трактора (а) и его центр тяжести (б)

<sup>1</sup>ГОСТ Р 516602-2000 «Копры для свайных работ. Общие технические условия».

<sup>2</sup>ГОСТ Р 50906-96 «Оборудование сваебойное. Общие требования безопасности».

<sup>3</sup>ЕНиР. «Сборник Е12. Свайные работы».

<sup>4</sup>«Копер КоГ-12.0.1.1-01 (СП49Д). Руководство по эксплуатации СП-49Д.00.00.000 РЭ» (PDF).

<sup>5</sup>«Копер навесной КоГ-12.0.1.1.01 (СП-49Д). Каталог сборочных единиц». – ООО Завод сваебойного оборудования (CATALOG\_SP49D\_ZSO pdf).

<sup>6</sup>СНиП 12-03-2001. «Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования».

Таблица 1

Наименование показателей	Норма
Базовый трактор	T10MB
Тип ходовой части	Гусеничный,
Тип привода механизма копра	Гидравлический
Максимальная длина забиваемой сваи, м	12,0
Максимальное сечение забиваемой сваи, мм	350×350
Максимальная масса забиваемой сваи, т	3,8
Максимальная грузоподъемность, т, в т.ч.	12
- на канате для подъема молота	7,0
- на канате для подъема сваи	5,0
Максимальный допустимый уклон стройплощадки	3°
Колея (ширина гусеничного хода), мм	2282±25
Рабочие наклоны мачты:	
- вправо-влево	7°
- вперед	7°
- назад	18°
Изменение вылета мачты, м, не более	0,4
Масса навесной части, без базовой машины и погружателя), т, не более	8,7
Максимальная масса молота с наголовником, т	6,0
Масса копра без молота	27,6
Габаритные размеры, мм	
- в рабочем положении	
- длина	4830
- ширина	5210
- высота	18510
- в транспортном положении	
- длина	10710
- высота	4700
- ширина	3540

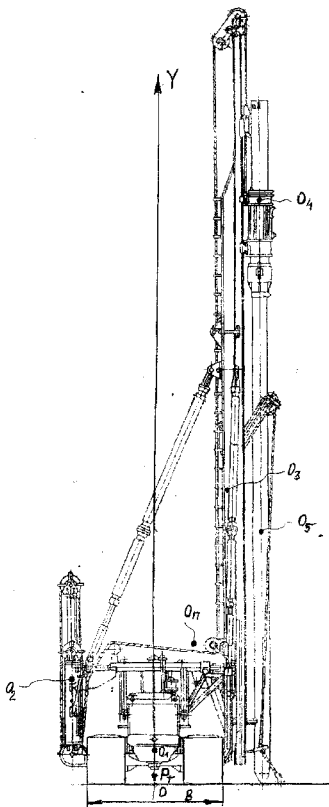


Рис. 4. К расчету копра на устойчивость

В результате расчета необходимо было определить для двух вариантов (с учетом выноса мачты влево от трактора на максимально возможное значение 0,4 м, а также без выноса мачты):

- центр тяжести масс снаряженной сваебойной машины;
- угол устойчивости в поперечной плоскости снаряженной машины.

На рис. 4 приведена принятая для расчета система координат:

- ось OX направлена по поверхности почвы направо;
- ось OY направлена вверх вдоль оси симметрии трактора;
- ось OZ направлена от плоскости рисунка.

На рис. 4 координаты центра тяжести масс трактора, левой части копра, правой части копра, молота, сваи и снаряженной сваебойной машины соответственно обозначены O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sub>4</sub>, O<sub>5</sub> и O<sub>П</sub>.

Координаты центра тяжести масс составляющих снаряженной сваебойной машины, а также сводные результаты расчета приведены в табл. 3.5.2.

Находим полную массу снаряженной машины

$$m_{\Pi} = m_T + m_K + m_M + m_C, \tag{1}$$

где m<sub>T</sub>, m<sub>K</sub>, m<sub>M</sub>, m<sub>C</sub> – соответственно масса трактора, копра, молота и сваи, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Данные для расчета с учетом выноса мачты на 0,4 м

Наименование	Масса m <sub>i</sub> , кг	Координаты ЦТ		Моменты сил	
		X <sub>i</sub> , м	Y <sub>i</sub> , м	m <sub>i</sub> g X <sub>i</sub> , Нм	m <sub>i</sub> g Y <sub>i</sub> , Нм
Трактор Т-10МБ	17300	0	0,81	0	137467
Копер СП-49Д:	8600	-	-	-	-
- правая часть копра	2000	-1,85	2,59	-36297	50816
- левая часть копра	6600	1,62+0,4	7,2	130787	466171
Молот СП-7	4700	2,3+0,4	14,1	124489	650109
Свая 0,35×0,35×12000 м	3400	2,3+0,4	6,1	90056	203459
Копер в сборе со сваяй	34000	0,93	4,11	309035	1370555

Массу копровой установки определим, исходя из данных табл. 1:

$$m_{\Pi} = 17300+8600+4700+3400=34000 \text{ кг.}$$

Разделим массу копра на две части. Правую по ходу движения трактора часть m<sub>к.л</sub> приведем к блоку полиспастов копра, а левую m<sub>к.п</sub> к его мачте. Тогда запишем

$$m_K + m_{к.л} + m_{к.п} \tag{2}$$

Принимаем m<sub>к.л</sub> = 2000 кг, m<sub>к.п</sub> = 6600 кг.

Расстояние между наружными поверхностями левой и правой гусеницы трактора Т-10МБ равным В = 3230 мм.

1. Определим все искомые параметры с учетом максимального выноса мачты влево от трактора по ходу его движения на 0,4 м.

Массы и координаты составляющих сваебойной машины с учетом выноса мачты на 0,4 м представлены в табл. 2.

Находим суммы моментов сил составляющих снаряженной машины:

$$\sum(m_i g X_i) = m_T g X_T + m_{к.п} g X_{к.п} + m_{к.л} g X_{к.л} + m_M g X_M + m_C g X_C, \tag{3}$$

$$\sum(m_i g Y_i) = m_T g Y_T + m_{к.п} g Y_{к.п} + m_{к.л} g Y_{к.л} + m_M g Y_M + m_C g Y_C, \tag{4}$$

где X и Y – абсцисса и ордината соответствующих сил, м;

g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Подставив значения из табл. 2, получим:

$$\sum(m_i g X_i) = 309035 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\sum(m_i g Y_i) = 1370555 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Находим координаты X<sub>П</sub> и Y<sub>П</sub> центра тяжести снаряженной машины со сваяй. Учитывая  $\sum(m_i g X_i) = m_{\Pi} g X_{\Pi}$ , а также  $\sum(m_i g Y_i) = m_{\Pi} g Y_{\Pi}$  можем записать:

$$X_{\Pi} = \frac{\sum m_i g X_i}{m_{\Pi} g}, \quad Y_{\Pi} = \frac{\sum m_i g Y_i}{m_{\Pi} g}, \tag{5}$$

Подставив значения, получим:

$$X_{II} = \frac{\sum m_i g X_i}{m_{II} g} = \frac{309035}{34000 \cdot 9,81} = 0,93 \text{ м}, \quad Y_{II} = \frac{\sum m_i g Y_i}{m_{II} g} = \frac{1370555}{34000 \cdot 9,81} = 4,11 \text{ м}.$$

Определим боковой угол устойчивости (относительно оси Z) снаряженной машины со свай по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = \frac{0,5B - X_{II}}{Y_{II}}, \quad (6)$$

где B – расстояние между наружными поверхностями левой и правой гусеницы, м.

Подставив значения, получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_6 = \operatorname{tg} a_6 = \frac{0,5 \cdot 3,230 - 0,93}{4,11} = \frac{0,715}{4,11} = 0,167 \text{ или } \alpha_6 = 9,48^\circ.$$

Таким образом, предельный угол боковой устойчивости, при котором произойдет опрокидывание машины, с учетом максимального выноса мачты влево от трактора по ходу его движения на 0,4 м, равен  $\alpha_6 = 9,48^\circ$ .

2. Определим все искомые параметры без учета выноса мачты влево от трактора по ходу его движения, используя данные табл. 3 – массы и координаты составляющих сваебойной машины без учета выноса мачты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные для расчета без учета выноса мачты

Наименование	Масса $m_i$ , кг	Координаты ЦТ		Моменты сил	
		$X_i$ , м	$Y_i$ , м	$m_i g X_i$ , Нм	$m_i g Y_i$ , Нм
Трактор Т-10МБ	17300	0	0,81	0	137467
Копер СП-49Д:	8600	-	-	-	-
- правая часть копра	2000	-1,85	2,59	-36297	50816
- левая часть копра	6600	1,62	7,2	104889	466171
Молот СП-7	4700	2,3	14,1	106046	650109
Свая 0,35×0,35×12000 м	3400	2,3	6,1	76714	203459
Копер в сборе со свай	34000	0,93	4,11	251352	1370555

В данном случае  $X_{II} = \frac{251352}{34000 \cdot 9,81} = 0,75 \text{ м}$ , а  $Y_{II} = 4,11$  – имеет ту же величину, как и в предыдущем случае.

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \alpha_6 = \operatorname{tg} a_6 = \frac{0,5 \cdot 3,230 - 0,75}{4,11} = \frac{0,865}{4,11} = 0,21 \text{ или } \alpha_6 = 11,86^\circ.$$

### Заключение

Проведенный расчет центра тяжести масс снаряженной сваебойной машины СП49Д на базе трактора Т-10МБ со свай с сечением 0,35×0,35 м и длиной 12 м показал:

1. Горизонтальная координата центра тяжести снаряженной машины смещена от вертикальной оси симметрии трактора вправо на 0,93 м при максимальном выносе мачты от трактора на 0,4 м и на 0,75 м без выноса мачты от трактора. Вертикальная координата центра тяжести снаряженной машины равна 4,11 м.

2. Предельный угол боковой устойчивости, при котором может произойти опрокидывание машины, с учетом максимального выноса мачты влево от трактора по ходу ее движения на 0,4 м, равен  $\alpha_6 = 9,48^\circ$ , а без выноса мачты  $\alpha_6 = 11,86^\circ$ .

3. Падение нагруженной копровой установки в поперечном направлении в сторону мачты возможен при превышении уклона строительной площадки:

- более чем на  $9,48^\circ$  при выносе на 400 мм по консоли мачты со свай;
- более чем на  $11,86^\circ$  без выноса по консоли мачты со свай.

4. Уклон строительной площадки не более чем на  $3^\circ$ , указываемый в Руководстве по эксплуатации копра, даже в поперечном направлении по ходу копра является гарантированно безопасным.

5. На строительном участке при забивке свай копровой установкой СП49 не было уклона грунтовой поверхности более чем на  $3^\circ$ .

6. Уклон грунтовой поверхности строительного участка не мог быть причиной опрокидывания копровой установки и ее падения.

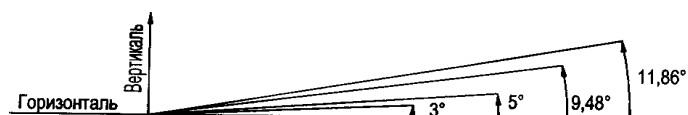


Рис. 5.

Для наглядного представления на рис. 5 изображены различные углы наклона к горизонтали.

### Список библиографических ссылок

1. Хузиахметов Р. А., Хузиахметова К. Р., Шарапова Н. Б. Обеспечение повышения уровня безопасности труда при организации и выполнении строительных работ // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 339–345.
2. Статистика производственного травматизма. URL: vawilon.ru (дата обращения: 04.07.2017).
3. Статистика // URL: www.trudcontrol.ru/press/statistics (дата обращения: 24.07.2017).
4. Анализ производственного травматизма. URL: http://otfi.ru (дата обращения: 24.07.2017).
5. Мирсаяпов И. Т., Хасанов Р. Р., Сафин Д. Р. Проектирование ограждений глубокого котлована жилого комплекса в условиях стесненной городской застройки // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 183–191.
6. Хузиахметов Р. А., Нуриева Д. М. Оценка состояния откоса котлована при устройстве свайных фундаментов // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 232–243.
7. Mirsayarov I. T., Shakirov M. I. Behavior models of plate-pile foundations under cyclic loading : Proceedings of the baltic piling days conference : Baltic Piling Days, Estonian Geotechnical Society ISSMGE / Tallin, 2012. С. 31–34.
8. Mirsayarov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading // Energy Geotechnics. Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on energy geotechnics : Germany / ICEGT. Kiel, 2016. С. 423–428.
9. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiatullin M. R., Makhmutov M.M. Risk management model in road transport systems // Journal of Conference Series. 2016. Т. 738. № 1. С. 012008.
10. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiatullin M. R., Makhmutov M.M. Modeling the dynamics of the chassis of construction machines // Journal of Conference Series. 2016. Т. 738. № 1. С. 012119.

**Khuziakmetov R.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [hroustam@mail.ru](mailto:hroustam@mail.ru)

**Sakhapov R.L.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [rusakhapov@gmail.com](mailto:rusakhapov@gmail.com)

**Zemdikhanov M.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [mr.minsur@mail.ru](mailto:mr.minsur@mail.ru)

**Andreeva S.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [saandreeva@mail.ru](mailto:saandreeva@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Calculation of the center of gravity of the masses and the stability angle in the transverse plane of the pile-driving copra SP-49D on the basis of the tractor T-10MB

#### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the study is to establish the possibility of tilting pile-driving copra due to exceeding the slope of the construction site at the site of pile production.

*Results.* The main results of the research are to determine the reasons for the violation of the requirements of the town-planning legislation and normative and technical documentation, as a result of which a roll-over was overturned, which resulted in the death of the driver. The main results of the study consist in the calculation of the center of gravity of the piling sowing mass and its stability in the transverse plane during the preparation of the piles for piling and during piling.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is the need to increase the level of safety in the performance of pile works and to take into account the actual conditions on the construction site in the places where they are performed (for example, the slope of the site at the site of work). On the investigated construction site, the slope of the construction site could not be the cause of the accident, since it did not exceed a guaranteed safe value of 3°.

**Keywords:** pile driving, injuries, accident, slope of the construction site, stability in the transverse plane, coordinates of the center of gravity of the masses, removal of the mast.

### References

1. Khuziakhmetov R. A., Khuziakhmetova K. R., Sharapova N. B. Ensuring increase in level of safety of work at the organization and realization of construction works // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 4 (38). P. 339–345.
2. Statistics of operational injuries. URL: [vavilon.ru](http://vavilon.ru) (reference date: 04.07.2017).
3. Statistics. URL: [www.trudcontrol.ru/press/statistics](http://www.trudcontrol.ru/press/statistics) (reference date: 24.07.2017).
4. Analysis of operational injuries // URL: <http://otfi.ru> (reference date: 24.07.2017).
5. Mirsaypov I. T., Khsanov R. R., Safin D. R. Design fence of deep foundation pit of residential complex in a congested urban area // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 2 (32). P. 183–191.
6. Khuziakhmetov R. A., Nurieva D. M. Assessment of a condition of a slope of a ditch at the device of the pile bases // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 3 (41). P. 232–243.
7. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Behavior models of plate-pile foundations under cyclic loading : Proceedings of the baltic piling days conference : Baltic Piling Days, Estonian Geotechnical Society ISSMGE / Tallin, 2012. P. 31–34.
8. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading // *Energy Geotechnics. Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on energy geotechnics : Germany / ICEGT*. Kiel, 2016. P. 423–428.
9. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiatullin M. R., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems // *Journal of Conference Series*. 2016. T. 738. № 1. P. 012008.
10. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiatullin M. R., Makhmutov M. M. Modeling the dynamics of the chassis of construction machines // *Journal of Conference Series*. 2016. T. 738. № 1. P. 012119.



УДК 691:624.138

**Буланов П.Е.** – ассистент

E-mail: [f\\_lays@mail.ru](mailto:f_lays@mail.ru)

**Вдовин Е.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru)

**Мавлиев Л.Ф.** – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)

**Строганов В.Ф.** – доктор химических наук, профессор

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Оптимизация состава и исследование влияния  
комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки  
на физико-технические свойства, укрепленных портландцементом,  
глинистых грунтов**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Оптимизировать состав и исследовать влияние комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на основе эфира поликарбоксилата и октилтриэтоксисилана на физико-технические свойства укрепленной портландцементом полиминеральной, каолинитовой и монтмориллонитовой глины.

*Результаты.* Исследованы основные физико-технические свойства укрепленных портландцементом глинистых грунтов, модифицированных комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавкой. Построена графическая интерпретация результатов математической модели, показывающей влияние компонентов комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на укрепленную портландцементом полиминеральную (с содержанием реликтовых минералов более 85 %), каолиновую (с содержанием минерала каолинита до 95 %) и монтмориллонитовую (содержанием минерала монтмориллонита до 70 %) глину.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в том, что введение комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки обеспечивает повышение прочности на сжатие укрепленной цементом полиминеральной глины на 102 %, каолинитовой глины – на 85 %, монтмориллонитовой глины – на 55 %, прочности на растяжении при изгибе – на 88 %, 71 % и 28 %, морозостойкости – на 114 %, 50 % и 52 % соответственно.

**Ключевые слова:** предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение при изгибе, морозостойкость, цементогрунт, полиминеральная глина, каолинистая глина, монтмориллонитовая глина.

**Введение**

История развития использования вяжущих для улучшения эксплуатационных свойств грунта в строительстве уходит корнями в далекое прошлое. Укрепленные грунтовые дороги существовали в Древней Месопотамии, Египте, Греции и Риме (McDowell M. T. Stabilization of soils with lime, lime-fly ash and other lime reactive materials // Highw res board. 1959. № 231. P. 60–66.).

Глинистые породы являются одними из наиболее широко распространенных видов грунтов. Из общего объема осадочных пород, составляющих 340 млн. км<sup>3</sup> (5 % литосферы), на их долю приходится 270 млн. км<sup>3</sup>. К ним относятся глины, суглинки, лессы, аргиллиты и др. (Овчаренко Ф. Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев: Издательство академии наук Украинской ССР, 1961. 275 с., Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. А. Грунтоведение. М.: Издательство «Наука», 2005. 1024 с.).

Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых показывают, что одним из путей совершенствования покрытий и оснований автомобильных дорог



является применение местных укрепленных грунтов. Основной задачей применения различных методов укрепления грунтов является более широкое использование местных грунтов как наиболее дешевого и доступного сырья, способного заменить привозные прочные каменные материалы, удорожающие стоимость строительства автомобильных дорог (Безрук В. М. Укрепленные грунты (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве). М.: Транспорт, 1982. 231 с.).

Широкое распространение в дорожном строительстве получили известь и цемент. Существенный вклад в развитие грунтов укрепленных неорганическими вяжущими, в частности цементом и известью, в строительстве внесли: В. М. Безрук, В. М. Могилевич, Ю. М. Васильев, Л. В. Гончарова, О. В. Тюменцева, Г. А. Левчановский, Л. А. Марков, В. М. Кнатько, В. А. Кельман, В. В. Охотин, М. М. Филатов, С. W. Correns, C. S. Dunn, J. Hashimoto, J. K. Mitchell, A. Herzod, G. H. Hilt, D. T. Davidson, J. G. Laguros, T. W. Lambe, R. C. Mainfort и др.

Известно, что наиболее эффективным способом укрепления явилось использование цемента. Продукты его гидратации уменьшают количество макропор за счет заполнения пространства между грунтовыми агрегатами, что в последующем ведет к уменьшению проницаемости материала. Помимо этого, использование грунтов, укрепленных цементом (цементогрунтов) в конструкциях дорожных одежд, положительно влияет на водно-тепловой режим земляного полотна и снижает колееобразование (Могилевич В. М. Дорожные одежды из цементогрунта. М.: Транспорт, 1972. 215 с.).

Ранее установлено, что для повышения прочности цементогрунтов целесообразно применение поликарбоксилатных суперпластификаторов [1], а для увеличения морозостойкости – кремнийорганического гидрофобизатора октилтриэтоксисилан [2]. Однако не определена возможность комплексного применения данных видов добавок при модификации цементогрунтов различного минерального состава. В этой связи целью данной работы является получение оптимального состава комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки (КППД) на основе эфира поликарбоксилата и октилтриэтоксисилана и исследование ее влияния на физико-технические свойства укрепленных портландцементом глинистых грунтов.

### **Экспериментальная часть**

Для приготовления цементогрунтовых образцов и проведения исследований использовались 3 глинистые разновидности грунтов.

Первый грунт отобран с карьера Сахаровского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан. Запасы данного грунта равны 2,102 млн. м<sup>3</sup> из 180,1 млн. м<sup>3</sup> разведанного глинистого сырья Республики Татарстан [3, 4]. По минеральному составу грунт в соответствии с ГОСТ 9169-75 относится к полиминеральной глине (ПГ), а по ГОСТ 25100-2011 к суглинку легкому пылеватому. Содержание реликтовых минералов более 85 % (52,49 % кварца).

Как известно, наиболее распространенными глинистыми минералами в грунтах являются монтмориллонит и каолинит. Глины, содержащие в себе данные минералы, тяжело поддаются укреплению. Поэтому, для выявления особенностей и процессов, происходящих при модификации глинистых грунтов, укрепленных портландцементом, исследованы модельные глины, близкие к мономинеральным.

Второй глинистый грунт произведен в Самарской области, ООО НПП «Промышленные минералы». В соответствии с ГОСТ 9169-75 по минеральному составу относится к каолиновой глине (КГ) с содержанием минерала каолинита до 95 %.

Третий глинистый грунт отобран из Биклянского карьера Тукаевского района Республики Татарстан. В соответствии с ГОСТ 9169-75 по минеральному составу относится к монтмориллонитовой глине (МГ) с содержанием минерала монтмориллонита до 70 %.

Для укрепления глинистых грунтов применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Ульяновскцемент». Ранее установлены расходы ПЦ, приводящих к наибольшей эффективности укрепления данных глинистых грунтов [10]: для полиминеральной глины, укрепленной портландцементом (ЦПГ) – 6-14 %, для каолиновой глины, укрепленной портландцементом (ЦКГ) – 10-26 %, для монтмориллонитовой глины, укрепленной

портландцементом (ЦМГ) – 16-32 %. ПЩ вводился в глинистые грунты в указанных дозировках.

В качестве модификатора цементогрунтов применены поликарбоксилатный суперпластификатор (ПКС) Pantarhit PC 160 Plv и кремнийорганический гидрофобизатор октилтриэтоксисилан (ОТЭС). Дозировка ПКС для ПГ 0,05-0,15 %, для КГ и МГ – 0,1-0,3 %. Дозировка ОТЭС для ПГ – 0,015-0,045 %, для КГ и МГ – 0,1-0,2 %.

Определение предела прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ) цементогрунтов производилось на образцах размером 10x10x10 см, предела прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) – 10x10x40 см в водонасыщенном в течение 2 суток состоянии по ГОСТ 10180-90. Морозостойкость изучалась согласно ГОСТ 10060.3-91 на образцах-кубах с ребром 10 см после 28 суток нормального твердения. Время замораживания составляло не менее 2,5 ч при температуре минус  $(18 \pm 2)$  °С, оттаивания  $2 \pm 0,5$  ч в воде при температуре  $(18 \pm 2)$  °С. Коэффициент морозостойкости ( $K_{мор}$ ) определяли, как отношение прочности образца после испытания на многократное замораживание и оттаивание к прочности образца до испытания. Коэффициент морозостойкости находили после проведения 15 циклов замораживания-оттаивания, что соответствует требованиям ГОСТ 23558-94 для покрытий дорожных одежд переходного типа районов со среднемесячной температурой воздуха наиболее холодного месяца до 15 °С.

Учитывая, что зависимость свойств строительных материалов от состава описываются уравнениями не выше второго порядка, для проведения экспериментальных исследований выбрано ротатабельное планирование второго порядка. Данный метод характеризуется хорошими характеристиками: ортогональность и композиционность. В основе выбраного плана реализован полнофакторный эксперимент: при трех факторах проведено 20 опытов: 8 опытов в вершинах куба, 6 опытов в звездных точках с плечом 1,682, 6 опытов в центре куба.

В качестве исходных независимых переменных определены следующие факторы: содержание ПЩ ( $X_1$ ), содержание ПКС ( $X_2$ ) и содержание ОТЭС ( $X_3$ ).

Обработка результатов экспериментов, проведенных в исследованиях с матрицей планирования эксперимента позволила получить графическую интерпретацию результатов математической модели, показывающей влияние компонентов комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на физико-технические свойства укрепленных портландцементом глинистых грунтов.

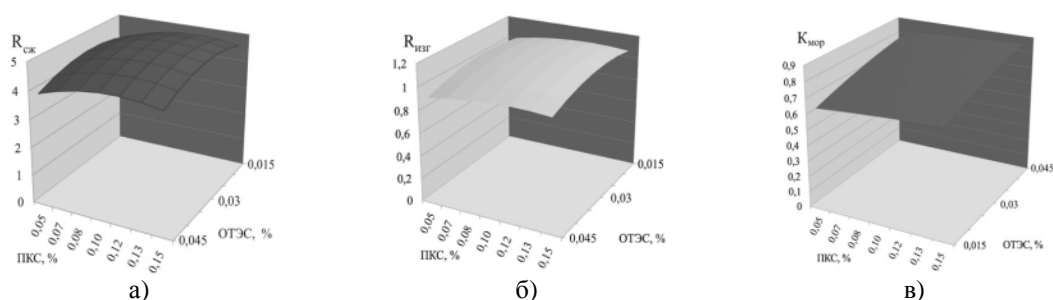


Рис. 1. Влияние состава КГПД на физико-технические свойства ЦПГ при расходе цемента 10 % от массы ПГ: а)  $R_{сж}$ ; б)  $R_{изг}$ ; в)  $K_{мор}^{15}$

Предел прочности на сжатие ЦПГ, модифицированной КГПД в сравнении с контрольным составом ЦПГ при 6 % ПЩ увеличился на 85,2 %, при 10 % – на 72,4 %, при 14 % – на 102,3 %. Предел прочности на растяжение при изгибе повысился при 6 % ПЩ на 77,4 %, при 10 % – на 98,2 %, при 14 % – на 88,9 %. При этом коэффициент морозостойкости после 15 циклов переменного замораживания-оттаивания увеличился на 65 %, 113,2 % и 114,0 % соответственно.

Предел прочности на сжатие ЦКГ, модифицированной КГПД, по сравнению с контрольным составом ЦКГ при 10 % ПЩ увеличился на 121,5 %, при 18 % – на 83,7 %, при 26 % – на 85,5 %. При этом предел прочности на растяжение при изгибе повысился

на 64,7 %, 42,6 % и 71,1 % соответственно. Коэффициент морозостойкости увеличился при 10 % ПЦ на 33 %, при 18 % – на 42 %, при 26 % – на 50 %.

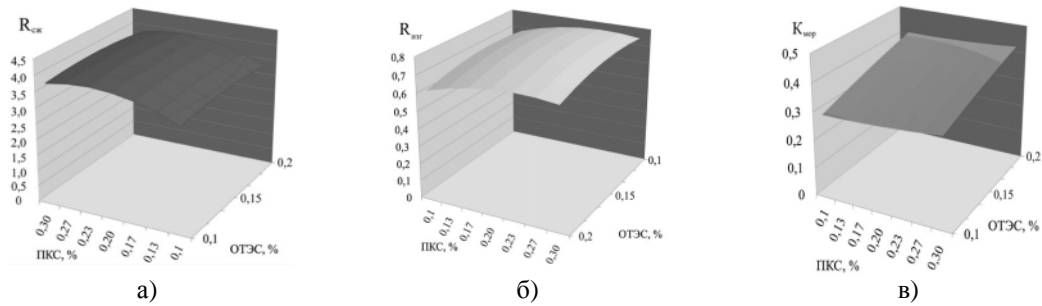


Рис. 2. Влияние состава КГПД на физико-технические свойства ЦКГ при расходе цемента 18 % от массы КГ: а)  $R_{сж}$ ; б)  $R_{изг}$ ; в)  $K_{мор}^{15}$

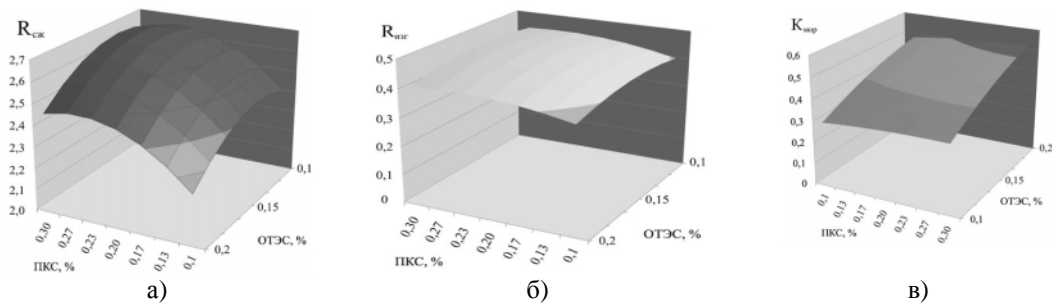


Рис. 3. Влияние состава КГПД на физико-технические свойства ЦМГ при расходе цемента 24 % от массы МГ: а)  $R_{сж}$ ; б)  $R_{изг}$ ; в)  $K_{мор}^{15}$

Таблица 1

**Состав и физико-технические свойства модифицированных цементогрунтов**

Наименование цементогрунта	Расход ПЦ, %	Количество ПКС, %	Количество ОТЭС, %	$R_{сж}$ , МПа	$R_{изг}$ , МПа	$K_{мор}$
ЦПГ	6	-	-	1,08	0,31	Разр.
		0,10	0,03	2,00	0,54	0,54
	10	-	-	2,90	0,56	0,38
		0,11	0,03	5,00	1,11	0,77
	14	-	-	4,44	0,81	0,43
		0,12	0,03	8,98	1,53	0,88
ЦКГ	10	-	-	0,79	0,17	Разр.
		0,22	0,15	1,75	0,28	0,27
	18	-	-	2,21	0,54	Разр.
		0,24	0,14	4,06	0,77	0,36
	26	-	-	3,59	0,90	Разр.
		0,25	0,14	6,66	1,40	0,45
ЦМГ	16	-	-	0,49	0,14	Разр.
		0,21	0,14	0,89	0,20	0,22
	24	-	-	1,87	0,32	Разр.
		0,25	0,13	2,69	0,46	0,33
	32	-	-	3,33	0,60	Разр.
		0,30	0,12	5,19	0,77	0,37

Предел прочности на сжатие ЦМГ, модифицированной КГПД, по сравнению с контрольным составом ЦМГ при 16 % ПЦ увеличился на 81,63 %, при 24 % – на 43,85 %, при 32 % – на 55,86 %. Предел прочности на растяжение при изгибе повысился при 16 % ПЦ на 42,86 %, при 24 % – на 43,75 %, при 32 % – на 28,33 %. Рост коэффициента морозостойкости при 16 % ПЦ составил 28 %, при 24 % – 43 %, при 32 % – 52 %.

В табл. 1 представлены составы и результаты испытаний цементогрунтов ЦПГ, ЦКГ и ЦМГ с различными расходами ПЦ, ПКС и ОТЭС.

Таблица 2

**Оптимальные расходы ПЦ и дозировки ПКС и ОТЭС для ЦПГ**

№ состава	Расход ПЦ, %	Кол-во ПКС, %	Кол-во ОТЭС, %	Марка по прочности	Марка по морозостойкости	Область применения в слоях и типах дорожных одежд
1	7,7	0,15	0,05	M20	F15	Основания и дополнительные слои оснований в переходных типах
2	9,0	0,15	0,03	M40	F15	Покрытия со слоем износа в переходных типах и основания в облегченных типах
3	11,2	0,12	0,03	M60	F15	
4	13,5	0,13	0,02	M75	F15, F25	

В табл. 2 представлены оптимальные расходы вяжущего и количество модифицирующих добавок при получении ЦПГ с требуемой прочностью и морозостойкостью в соответствии с областью применения по ГОСТ 23558-94.

**Обсуждение результатов**

Полученные результаты позволили нам предположить, что повышение прочности укрепленных портландцементом глинистых грунтов происходит за счет пептизации цементных флокул с появлением большего количества новообразований из-за высвобождения иммобилизованной воды, снижения коэффициента внутреннего трения, увеличения электростатического отталкивания частиц вследствие значительного изменения их электрокинетического потенциала [5-7], а также в результате адсорбции и хемосорбции компонентов комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на поверхности алюмосиликатных слоев глинистых минералов. Адсорбция, в свою очередь, очевидно приводит к уменьшению оптимальной влажности смеси с увеличением плотности, а хемосорбция – к образованию органоминеральных связей аналогично процессам отмеченным в публикациях [8-18]. Увеличение морозостойкости укрепленных грунтов, достигается за счет гидрофобизации стенок пор и капилляров кремнийорганическим соединением и формирования более плотной и однородной структуры [2].

**Заключение**

Таким образом установлено, что введение комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки обеспечивает повышение прочности на сжатие укрепленной цементом полиминеральной глины на 102,3 %, каолиновой глины – на 85,5 %, монтмориллонитовой глины – на 55,9 %, прочности на растяжении при изгибе – на 88,9 %, 71,1 % и 28,3 %, морозостойкости – на 114,0 %, 50,0 % и 52,0 % соответственно.

Определены зависимости влияния расхода портландцемента, состава и дозировки комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на основе эфира поликарбоксилата и октилтриэтоксисилана на физико-технические свойства полиминеральной, каолиновой и монтмориллонитовой глин. Оптимизирован состав укрепленной цементом полиминеральной глины, модифицированной комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавкой с учетом области применения в дорожной одежде. Получены материалы с маркой по прочности M20, M40, M60, M75 и морозостойкости F15 и F25 для использования в конструкциях дорожных одежд во II и III дорожно-климатической зоне Российской Федерации.

## Список библиографических ссылок

1. Буланов П. Е., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Влияние пластифицирующих добавок на физико-механические свойства цементогрунта дорожного назначения // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (31). С. 160–164.
2. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road soil cement with complex additives based on organosilicon compounds and electrolytes // ZKG: ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL. 2016. Vol. 69. № 9. P. 49–54.
3. Валитов Н. В., Зорина С. О., Афанасьева Н. И., Антонов В. А., Сабиров А. А., Чайкин В. Г., Месхи А. М., Глебашев С. Г., Закирова Ф. А., Лужбина И. В. Минералогия верхнепермского и мезокайнозойского комплексов Республики Татарстан. Казань : КГУ, 2007. 456 с.
4. Васянов Г. П., Горбачев Б. Ф., Красникова Е. В., Садыков Р. К., Кабиров Р. Р. Глинистое легкоплавкое керамическое сырье Республики Татарстан (состояние сырьевой базы и опыт применения светложущихся полиминеральных глин) // Георесурсы. 2015. № 4 (63). С. 44–49.
5. Буланов П. Е., Гимазов А. Р., Замалиев И. Р., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. В. Влияние содержания портландцемента на свойства укрепленных глинистых грунтов различного минерального // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 9. С. 24–27.
6. Фаликман В. Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. 2009. № 2 (28). С. 86–90.
7. Камалова З. А., Ермилова Е. Ю., Рахимов Р. З., Стоянов О. В. Влияние ускорителей на кинетику твердения композиционного цементного камня с добавкой супер- и гиперпластификатора // Вестник казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 40–43.
8. Koizumi K., Umemura Y., Tsuyuki N. Effects of chemical admixtures on the silicate structure of hydrated portland cement // Proceedings of the 12<sup>th</sup> international congress on the chemistry of cement. montreal. 2007. P. 64–71.
9. Jaernstrom L., Stenius P. Adsorption of polyacrylate and carboxy methyl cellulose on kaolinite: salt effects and competitive adsorption // Colloids surf. 1990. 50. P. 47–73.
10. Jeknavorian A. A., Jardine L., Ou C. C., Koyata H., Folli K. J. Interaction of superplasticizers with clay-bearing aggregates: special publication AG 7<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / Berlin, Germany, 2003. P. 1293–1316.
11. Sakai E., Atarashi D., Daimon M. Interaction between superplasticizers and clay minerals: special publication 1/6<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / China, 2006. P. 1560–1566.
12. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Interactions between superplasticizers and clay minerals // Cem. sci. concr technol. 2004. № 58. P. 387–392.
13. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Influence of clay minerals on fluidity of  $\text{CaSO}_3$  suspension containing comb-type polymer // Cem. sci. concr. technol. 2003. № 57. P. 386–391.
14. Amarasinghe P. M., Katti K. S., Katti D. R. Nature of organic fluid-montmorillonite interactions: an FTIR spectroscopic // J. colloid interface sci. 2009. 337. P. 97–105.
15. Burchill S., Hall P. L., Harrison R., Hayes M. H. B., Langford J. I., Livingston W. R., Smedley R. J., Ross D. K., Tuck J. J. Smectite-polymer interactions in aqueous // Clay minerals. 1983. № 18. P. 373–397.
16. Suter J. L., Coveney P. V. Computer simulation study of the materials properties of intercalated and exfoliated poly(ethylene)glycol clay nanocomposites // Soft mater. 2009. № 11. P. 2239–2251.
17. Lei L., Plank J. A study on the impact of different clay minerals on the dispersing force of conventional and modified vinyl ether based polycarboxylate superplasticizers // Cement and concrete research. 2014. № 60. P. 1–10.
18. Zhang L., Lu Q., Xu Zh., Liu Q., Zeng H. Effect of polycarboxylate ether comb-type polymer on viscosity and interfacial properties of kaolinite clay suspensions // Journal of colloid and interface science. 2012. № 378. P. 222–231.

**Bulanov P.E.** – assistant

E-mail: [f\\_lays@mail.ru](mailto:f_lays@mail.ru)

**Vdovin E.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru)

**Mavliev L.F.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)

**Stroganov V.F.** – doctor of chemical sciences, professor

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Optimization of composition and investigation of the effect of complex hydrophobic-plasticizing additive on physico-technical properties, reinforced with Portland cement, clay soils**

#### **Abstract**

*Problem statement.* Optimize the composition of the complex hydrophobic-plasticizing additive based on polycarboxylate and octyltriethoxysilane ether and investigate its effect on the physico-technical properties of polymineral, kaolinite and montmorillonite clay reinforced with portland cement.

*Results.* The main physico-technical properties of clay soils reinforced with Portland cement, modified with a complex hydrophobic-plasticizing additive, are studied. A graphical interpretation of the results of a mathematical model showing the effect of the components of a complex hydrophobic-plasticizing additive on a polymineral reinforced with portland cement (with a content of relic minerals greater than 85 %), kaolinitic (with a kaolinite mineral content up to 95 %) and montmorillonite (with a montmorillonite mineral content up to 70 %) clay.

*Conclusions.* The significance for the construction industry is that the introduction of a complex hydrophobic-plasticizing additive led to an increase in compressive strength of cement-reinforced polymineral clay by 102 %, kaolinitic clay by 86 %, montmorillonite clay by 56 %, tensile strength at bending – by 89 %, 71 % and 28 %, frost-resistance – by 114 %, 50 % and 52 % respectively.

**Keywords:** ultimate compressive strength, ultimate tensile strength, freeze-thaw resistance, soil-cement, polymineral clay, kaolinitic clay, montmorillonite clay.

#### **References**

1. Bulanov P. Ye., Vdovin Ye. A., Mavliyev L. F. Influence of plasticizers on physical and mechanical properties of soil-cement for road purpose // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 1 (31). P. 160–164.
2. Kamalova Z. A., Yermilova Ye. Yu., Rakhimov R. Z., Stoyanov O. V. Influence of accelerators on the kinetics of hardening of composite cement stone with the addition of super- and hyperplasticizer // *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17. № 15. P. 40–43.
3. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes // *ZKG: ZEMENT-KALK-GIPS INTERNATIONAL*. 2016. Vol. 69. № 9. P. 49–54.
4. Valitov N. V., Zorina S. O., Afanas'yeva N. I., Antonov V. A., Sabirov A. A., Chaykin V. G., Meskhi A. M., Glebashev S. G., Zakirova F. A., Luzhbina I. V. Minerageny of the Upper Permian and Mesozoozoic complexes of the Republic of TatarstanKazan': KGU, 2007. 456 p.
5. Vasyanov G. P., Gorbachev B. F., Krasnikova E. V., Sadykov R. K., Kabirov R. R. Clay low-melting ceramic raw materials of the Republic of Tatarstan (the state of the raw material base and the experience of using light-cladding polymineral clays) // *Georesursy*. 2015. № 4 (63). P. 44–49.

6. Bulanov P. E., Gimazov A. R., Zamaliev I. R., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Effect of Portland Cement Content on Properties strengthened clay soils of various mineralogical composition // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 20. № 9. P. 24–27.
7. Falikman V. R. Polycarboxylate hyperplasticizers: yesterday, today, tomorrow // *Populyarnoye betonovedeniye*. 2009. № 2 (28). P. 86–90.
8. Koizumi K., Umemura Y., Tsuyuki N. Effects of chemical admixtures on the silicate structure of hydrated portland cement // *Proceedings of the 12<sup>th</sup> international congress on the chemistry of cement montreal*. 2007. P. 64–71.
9. Jaernstrom L., Stenius P. Adsorption of polyacrylate and carboxy methyl cellulose on kaolinite: salt effects and competitive adsorption // *Colloids surf*. 1990. 50. P. 47–73.
10. Jeknavorian A. A., Jardine L., Ou C. C., Koyata H., Folli K. J. Interaction of superplasticizers with clay-bearing aggregates: special publication AG 7<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / Berlin, Germany, 2003. P. 1293–1316.
11. Sakai E., Atarashi D., Daimon M. Interaction between superplasticizers and clay minerals: special publication 1/6<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / China, 2006. P. 1560–1566.
12. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Interactions between superplasticizers and clay minerals // *Cem. sci. concr technol*. 2004. № 58. P. 387–392.
13. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Influence of clay minerals on fluidity of caco3 suspension containing comb-type polymer // *Cem. sci. concr. technol*. 2003. № 57. P. 386–391.
14. Amarasinghe P. M., Katti K. S., Katti D. R. Nature of organic fluid-montmorillonitey interactions: an FTIR spectroscopic // *J. colloid interface sci*. 2009. 337. P. 97–105.
15. Burchill S., Hall P. L., Harrison R., Hayes M. H. B., Langford J. I., Livingston W. R., Smedley R. J., Ross D. K., Tuck J. J. Smectite-polymer interactions in aqueous // *Clay minerals*. 1983. № 18. P. 373–397.
16. Suter J. L., Coveney P. V. Computer simulation study of the materials properties of intercalated and exfoliated poly(ethylene)glycol clay nanocomposites // *Soft mater*. 2009. № 11. P. 2239–2251.
17. Lei L., Plank J. A study on the impact of different clay minerals on the dispersing force of conventional and modified vinyl ether based polycarboxylate superplasticizers // *Cement and concrete research*. 2014. № 60. P. 1–10.
18. Zhang L., Lu Q., Xu Zh., Liu Q., Zeng H. Effect of polycarboxylate ether comb-type polymer on viscosity and interfacial properties of kaolinite clay suspensions // *Journal of colloid and interface science*. 2012. № 378. P. 222–231.

УДК 691:624.138

**Буланов П.Е.** – ассистент

E-mail: [f\\_lays@mail.ru](mailto:f_lays@mail.ru)

**Мавлиев Л.Ф.** – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)

**Вдовин Е.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru)

**Строганов В.Ф.** – доктор химических наук, профессор

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Асадуллина А.Р.** – заместитель начальника планово-экономического отдела

E-mail: [alinaasadullina@yandex.ru](mailto:alinaasadullina@yandex.ru)

**ГКУ «Главтатдортранс»**

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Достоевского, д. 18/75

**Сафин Д.Р.** – инженер производственно-технического отдела

E-mail: [dinar-safin-95@mail.ru](mailto:dinar-safin-95@mail.ru)

**ООО «Служба проектных решений»**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Саид-Галеева, д. 6.

### **Влияние пластифицирующих добавок различной химической основы на физико-технические свойства глинистых грунтов, укрепленных портландцементом**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель – исследовать влияние пластифицирующих добавок различной химической основы на физико-технические свойства глинистых грунтов, укрепленных портландцементом (цементогрунтов).

*Результаты.* Определен уровень физико-технических показателей укрепленной портландцементом полиминеральной (с содержанием реликтовых минералов более 85 %), каолиновой (с содержанием минерала каолинита до 95 %) и монтмориллонитовой (содержанием минерала монтмориллонита до 70 %) глины с добавками пластификаторов различной химической основы.

*Выводы.* Значимость для строительной отрасли заключается в том, что введение эфира поликарбоксилата в состав цементогрунтов в зависимости от вида глинистого грунта и расхода портландцемента обеспечило повышение прочности на сжатие до 94 %, прочности на растяжении при изгибе до 76 %, морозостойкости до 43 %.

**Ключевые слова:** предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение при изгибе, морозостойкость, глинистый грунт, каолинит, монтмориллонит, пластифицирующие добавки, цементогрунт.

#### **Введение**

При укреплении глинистых грунтов цементом в ряде случаев возникает необходимость повышения физико-технических свойств цементогрунта, используя добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ) (Безрук В.М. Укрепленные грунты (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве). М.: Транспорт, 1982. 231 с.).

В основу укрепления грунтов цементом совместно с модифицирующими добавками положен принцип направленного регулирования физико-химических свойств укрепляемого грунта для создания оптимальных условий формирования прочной, водоустойчивой и морозостойкой структуры цементогрунта (Могилевич В.М. Дорожные одежды из цементогрунта. М.: Транспорт, 1972. 215 с.).

Одними из наиболее известных, доступных и эффективных химических добавок для повышения эффективности цемента в цементных композитах, повышающих физико-технические свойства, являются пластифицирующие добавки, особенно на поликарбоксилатной основе [1, 2].



Ранее в работе [3] показано положительное действие поликарбоксилатного суперпластификатора на физико-технические свойства цементогрунтов.

Однако, недостаточно исследованным остается влияние суперпластификаторов различной химической основы на физико-технические свойства укрепленных портландцементом глинистых грунтов различного минерального состава.

### Экспериментальная часть

При исследовании использованы три разновидности глинистых грунтов. Первый грунт был отобран с карьера Сахаровского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан. Запасы данного грунта составляют 2,102 млн. м<sup>3</sup> из 180,1 млн. м<sup>3</sup> разведанного глинистого сырья Республики Татарстан [4, 5]. По минеральному составу грунт в соответствии с ГОСТ 9169-75 относится к полиминеральной глине (ПГ), а по ГОСТ 25100-2011 в соответствии с числом пластичности и содержанием песчаных частиц к суглинку легкому пылеватому. Содержание реликтовых минералов более 85 % (52 % кварца). Выбранный глинистый грунт удовлетворяет требованиям ГОСТ 23558-94 по числу пластичности, согласно которому для укрепления неорганическими вяжущими при строительстве оснований и покрытий автомобильных дорог не должно превышать 12.

Как известно, наиболее распространенными глинистыми минералами в глинах являются монтмориллонит и каолинит [6]. Глины, содержащие в себе данные минералы, тяжело поддаются укреплению. Поэтому, для выявления особенностей влияния добавок на данные минералы в качестве двух других разновидностей приняты глины, близкие к мономинеральным: каолинистая глина (КГ) с содержанием минерала каолинита до 95 % и монтмориллонитовая глина (МГ) с содержанием минерала монтмориллонита до 70 %.

В качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ).

Для модификации ЦГ применены добавки, являющиеся представителями основных химических групп пластификаторов: сульфенированное меламинформальдегидное соединение (СМФ), сульфенированное нафталинформальдегидное соединение (СНФ), лигносульфонат технический (ЛСТ), поликарбоксилат (ПКС).

Ранее, в работе [7], установлен расход ПЦ, обеспечивающее наибольшую эффективность укрепления рассмотренных глинистых грунтов. Для полиминеральной глины, укрепленной портландцементом (ЦПГ), оптимальный расход цемента составляет 6-14 %, для каолинистой глины, укрепленной портландцементом (ЦКГ) – 10-26 %, для монтмориллонитовой глины, укрепленной портландцементом (ЦМГ) – 16-32 %. ПЦ вводился в глинистые грунты в указанных дозировках.

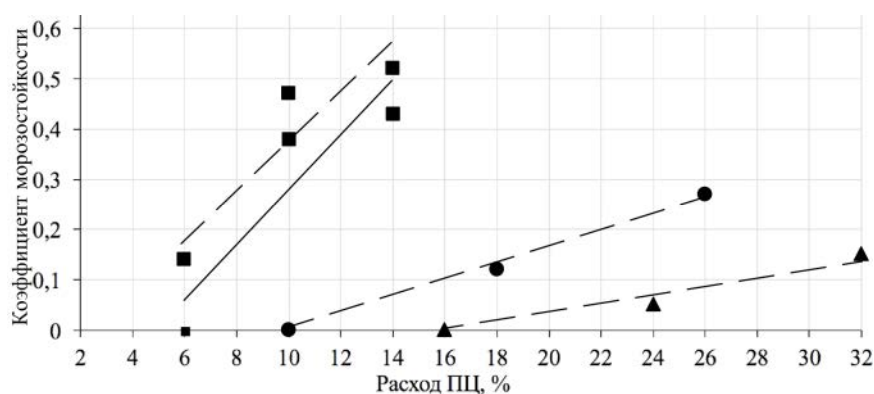


Рис. 1. Зависимость коэффициента морозостойкости образцов цементогрунтов (15 циклов замораживания-оттаивания) от расхода ПЦ: ■ – ПГ; ● – КГ; ▲ – МГ  
— контрольные составы; - - - составы, модифицированные ПКС

Пластифицирующие добавки вводились в ЦПГ в дозировках 0,025, 0,05, 0,075, 0,100, 0,125, 0,150, 0,175, 0,200 %, в ЦКГ и ЦМГ – 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 %. Вода добавлялась в цементогрунтовые смеси до достижения максимальной плотности. Результаты исследований представлены на рис. 1-2, табл. 1-3.

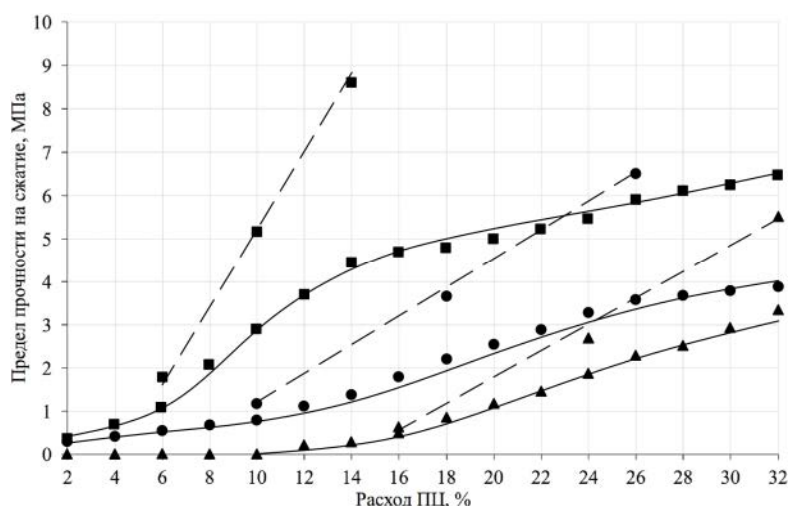


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии образцов цементогрунтов от расхода ПЦ: ■ – ПГ; ● – КГ; ▲ – МГ  
 ——— контрольные составы; - - - - составы, модифицированные ПКС

Таблица 1

**Влияние пластифицирующих добавок на показатели стандартного уплотнения и физико-технические свойства ЦПГ**

Наименование добавки	Количество добавки, %	Показатели стандартного уплотнения		Физико-технические свойства ЦПГ		
		$W_{опт}, \%$	$\rho_{max}, \text{г/см}^3$	$R_{сж}, \text{МПа}$	$R_{изг}, \text{МПа}$	$K_{мор}$
При 6 % ПЦ от массы ПГ						
-	-	15,02	1,90	1,08	0,31	Разр.
СМФ	0,125	13,97	1,92	1,50	0,38	0,14
СНФ	0,125	14,33	1,92	1,52	0,39	0,12
ЛСТ	0,100	13,91	1,92	1,35	0,35	0,09
ПКС	0,100	13,76	1,92	1,78	0,43	0,14
При 10 % ПЦ от массы ПГ						
-	-	13,81	1,92	2,90	0,56	0,38
СМФ	0,150	12,67	1,95	4,23	0,78	0,46
СНФ	0,150	12,62	1,95	4,32	0,79	0,44
ЛСТ	0,100	11,99	1,94	3,68	0,69	0,40
ПКС	0,100	11,63	1,95	5,16	0,92	0,47
При 14 % ПЦ от массы ПГ						
-	-	12,29	1,95	4,44	0,81	0,43
СМФ	0,150	10,83	1,99	6,93	1,16	0,50
СНФ	0,150	10,73	1,99	7,01	1,18	0,49
ЛСТ	0,125	10,48	1,99	5,77	1,01	0,47
ПКС	0,125	10,3	2,00	8,61	1,47	0,52

Анализ табл. 1-3 и рис. 1-2 показал, что наибольшее повышение прочности и морозостойкости у образцов цементогрунтов, а также увеличение максимальной плотности и снижение оптимальной влажности цементогрунтовых смесей наблюдалось с добавкой ПКС при укреплении ПЦ всех исследуемых глинистых грунтов. Это обстоятельство подтверждается многочисленными исследованиями в области изучения влияния данного вида пластифицирующей добавки на цементные системы [1]. Однако, при этом морозостойкость глинистых грунтов, укрепленных портландцементом, не достигает требуемых значений, поэтому требуется комплексная модификация.

Таблица 2

**Влияние пластифицирующих добавок  
на показатели стандартного уплотнения и физико-технические свойства ЦКГ**

Наименование добавки	Количество добавки, %	Показатели стандартного уплотнения		Физико-технические свойства ЦКГ		
		W <sub>опт</sub> , %	ρ <sub>max</sub> , г/см <sup>3</sup>	R <sub>сж</sub> , МПа	R <sub>изг</sub> , МПа	K <sub>мор</sub>
1	2	3	4	6	7	8
При 10 % ПЦ от массы КГ						
-	-	24,04	1,55	0,79	0,17	Разр.
СМФ	0,20	23,56	1,56	0,96	0,19	Разр.
СНФ	0,20	23,06	1,56	0,98	0,19	Разр.
ЛСТ	0,20	22,63	1,59	0,94	0,18	Разр.
ПКС	0,15	23,02	1,64	1,16	0,20	Разр.
При 18 % ПЦ от массы КГ						
-	-	22,11	1,6	2,21	0,54	Разр.
СМФ	0,20	21,32	1,63	2,89	0,68	0,09
СНФ	0,20	20,97	1,64	2,99	0,68	Разр.
ЛСТ	0,20	20,81	1,68	2,67	0,64	Разр.
ПКС	0,20	20,41	1,71	3,66	0,71	0,12
При 26 % ПЦ от массы КГ						
-	-	20,22	1,66	3,59	0,9	Разр.
СМФ	0,20	19,08	1,69	5,09	1,22	0,25
СНФ	0,20	19,01	1,70	5,17	1,23	0,23
ЛСТ	0,20	18,57	1,72	4,57	1,15	0,22
ПКС	0,20	18,32	1,74	6,50	1,51	0,27

Таблица 3

**Влияние пластифицирующих добавок  
на показатели стандартного уплотнения и физико-технические свойства ЦМГ**

Наименование добавки	Количество добавки, %	Показатели стандартного уплотнения		Физико-технические свойства ЦМГ		
		W <sub>опт</sub> , %	ρ <sub>max</sub> , г/см <sup>3</sup>	R <sub>сж</sub> , МПа	R <sub>изг</sub> , МПа	K <sub>мор</sub>
1	2	3	4	6	7	8
При 16 % ПЦ от массы МГ						
-	-	24,11	1,56	0,49	0,14	Разр.
СМФ	0,25	23,13	1,58	0,57	0,15	Разр.
СНФ	0,25	23,12	1,58	0,58	0,15	Разр.
ЛСТ	0,25	22,72	1,61	0,55	0,14	Разр.
ПКС	0,20	22,01	1,61	0,62	0,16	Разр.
При 24 % ПЦ от массы МГ						
-	-	21,88	1,59	1,87	0,32	Разр.
СМФ	0,25	20,98	1,63	2,35	0,37	0,04
СНФ	0,25	20,61	1,64	2,39	0,37	Разр.
ЛСТ	0,25	20,23	1,66	2,23	0,36	Разр.
ПКС	0,25	19,21	1,69	2,67	0,40	0,05
При 32 % ПЦ от массы МГ						
-	-	19,92	1,64	3,33	0,60	Разр.
СМФ	0,25	19,09	1,69	4,36	0,73	0,13
СНФ	0,25	19,10	1,70	4,49	0,74	0,09
ЛСТ	0,25	18,49	1,72	4,12	0,71	Разр.
ПКС	0,25	16,74	1,75	5,5	0,79	0,15

При сравнении добавок СМФ, СНФ и ЛСТ в ЦПГ, ЦКГ и ЦМГ установлено, что наибольшее увеличение максимальной плотности и снижение оптимальной влажности наблюдается для образцов с добавкой ЛСТ, а наибольшее повышение предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при изгибе – у образцов с добавкой СНФ, и морозостойкости – у образцов с добавкой СМФ.

### Обсуждение результатов

В исследованиях [8-12] показано, что ПАВ могут адсорбироваться на глинистых частицах, а суперпластификаторы на основе сульфомеламинформальдегидов и сульфонафталинформальдегидов в меньшей степени склонены взаимодействию с глинистыми минералами, чем эфиры поликарбоксилата [9-12], что отражается на физико-технических свойствах укрепленных цементом грунтов.

Известно, что поликарбоксилатные суперпластификаторы в основном состоят из двух основных элементов: основной цепи (метакриловая кислота, малеиновая кислота и т.д.) и боковой цепи (сложные спирты в виде полиэтиленгликоля и т.д.). Теоретически существует 2 основных вида взаимодействий глинистых минералов с эфирами поликарбоксилатов [8].

– Электростатическое взаимодействие между положительно заряженными участками на сколах глинистых минералов и отрицательно заряженными группами пластификатора. Следует отметить, что с растворением цемента в глине происходит повышение значений рН, а гидратированные группы –ОН глинистых минералов депротонируются и меняются на отрицательный заряд [13, 14].

– Интеркаляция полигликолей между алюмосиликатными слоями, происходящих с помощью Н-связей, на частично поляризованные атомы кислорода, присутствующие в полиэтиленоксиде и молекуле воды, на частично закрепленные силанольные группы, присутствующие на алюмосиликатных слоях глинистых минералов [15, 16]. Боковые группы полиэтилена, присутствующие в эфире поликарбоксилата, имеют сходный химический состав с полигликолями, а полигликоли, особенно с высокой молекулярной массой, как известно, легко адсорбируются на глинистых минералах [11].

### Заключение

Таким образом, установлено, что наиболее эффективной пластифицирующей добавкой в повышении физико-технических свойств глинистых грунтов, укрепленных портландцементом, является эфир поликарбоксилат, введение которого обеспечивает увеличение: прочности на сжатие в полиминеральной глине – на 93,9 %, в каолиновой глине – на 81,9 %, в монтмориллонитовой глине – на 65,2 %; прочности на растяжении при изгибе – на 81,5 %, 67,8 % и 31,7 % соответственно; морозостойкости – на 34,9 %, 30,0 % и 22,0 %. Установлен уровень оптимальной дозировки эфира поликарбоксилата в укрепленных портландцементом глинистых грунтах, при которых достигается максимальная прочность, в зависимости от содержания вяжущего, составили: для полиминеральной глины – 0,1-0,125 %, для каолиновой и монтмориллонитовой глин – 0,15-0,25 % от массы глинистых грунтов.

Выявлено, что наиболее эффективной пластифицирующей добавкой для повышения прочности и морозостойкости глинистых грунтов, укрепленных ПЩ, является ПКС. Однако, при этом морозостойкость глинистых грунтов, укрепленных портландцементом, не достигает требуемого уровня значений, поэтому и требуется применение комплексной модификации.

### Список библиографических ссылок

1. Plank J., Sakai E., Miao C. W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability // *Cement and concrete research*. 2015. Vol. 78. P. 81–99.
2. Камалова З. А., Ермилова Е. Ю., Рахимов Р. З., Стоянов О. В. Влияние ускорителей на кинетику твердения композиционного цементного камня с добавкой супер- и гиперпластификатора // *Вестник казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 15. С. 40–43.
3. Буланов П. Е., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Влияние пластифицирующих добавок на физико-механические свойства цементогрунта дорожного назначения // *Известия КГАСУ*. 2015. № 1 (31). С. 160–164.
4. Валитов Н. В., Зорина С. О., Афанасьева Н. И., Антонов В. А., Сабиров А. А., Чайкин В. Г., Месхи А. М., Глебашев С. Г., Закирова Ф. А., Лужбина И. В.

- Минералогия верхнепермского и мезокайнозойского комплексов Республики Татарстан. Казань : КГУ, 2007. 456 с.
5. Васянов Г. П., Горбачев Б. Ф., Красникова Е. В., Садыков Р. К., Кабиров Р. Р. Глинистое легкоплавкое керамическое сырье Республики Татарстан (состояние сырьевой базы и опыт применения светложгущихся полиминеральных глин) // Георесурсы. 2015. № 4 (63). С. 44–49.
  6. Минке Г. Глинобетон и его применение. М. : Издательство янтарный сказ, 2004. 232 с.
  7. Буланов П. Е., Гимазов А. Р., Замалиев И. Р., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. В. Влияние содержания портландцемента на свойства укрепленных глинистых грунтов различного минерального // Вестник казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 9. С. 24–27.
  8. Jaernstrom L., Stenius P. Adsorption of polyacrylate and carboxy methyl cellulose on kaolinite: salt effects and competitive adsorption // Colloids surf. 1990. 50. P. 47–73.
  9. Jeknavorian A. A., Jardine L., Ou C. C., Koyata H., Folli K. J. Interaction of superplasticizers with clay-bearing aggregates: special publication AG 7<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / Berlin, Germany, 2003. P. 1293–1316.
  10. Sakai E., Atarashi D., Daimon M. Interaction between superplasticizers and clay minerals: special publication 1/6<sup>th</sup> CANMET Conference on superplasticizers and other chemical admixtures / China, 2006. P. 1560–1566.
  11. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Interactions between superplasticizers and clay minerals // Cem. sci. concr technol. 2004. № 58. P. 387–392.
  12. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Influence of clay minerals on fluidity of  $\text{CaCO}_3$  suspension containing comb-type polymer // Cem. sci. concr. technol. 2003. № 57. P. 386–391.
  13. Tombacz E., Szekeres M. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes // Appl. clay sci. 2004. № 27. P. 75–94.
  14. Ng S., Plank J. Interaction mechanisms between na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers // Cement and concrete research. 2012. № 42. P. 847–854.
  15. Amarasinghe P. M., Katti K. S., Katti D. R. Nature of organic fluid-montmorillonite interactions: an FTIR spectroscopic // J. colloid interface sci. 2009. № 337. P. 97–105.
  16. Burchill S., Hall P. L., Harrison R., Hayes M. H. B., Langford J. I., Livingston W. R., Smedley R. J., Ross D. K., Tuck J. J. Smectite-polymer interactions in aqueous // Clay minerals. 1983. № 18. P. 373–397.

**Bulanov P.E.** – assistant

E-mail: [f\\_lays@mail.ru](mailto:f_lays@mail.ru)

**Mavliev L.F.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)

**Vdovin E.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [vdovin007@mail.ru](mailto:vdovin007@mail.ru)

**Stroganov V.F.** – doctor of chemical sciences, professor

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Asadullina A.R.** – deputy head of planning and economic department

E-mail: [alinaasadullina@yandex.ru](mailto:alinaasadullina@yandex.ru)

**SPI «Glavtadortrans»**

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Dostoevskiy st., 18/75.

**Safin D.R.** – engineer of production and technical department

E-mail: [dinar-safin-95@mail.ru](mailto:dinar-safin-95@mail.ru)

**LTD «Sluzhba proyektnykh resheniy»**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Said-Galeeva st., 6.

## Effect of water-reducing agents with various chemical bases on the physical and technical properties of clay soils reinforced by Portland cement

### Abstract

*Problem statement.* The aim of the article is to investigate the effect of water-reducing agents with various chemical bases on the physical and technical properties of clay soils reinforced by Portland cement (soil-cement).

*Results.* The level of the main physical and technical properties of polymineral (containing relict minerals more than 85 %), kaolinic (with the content of kaolinite up to 95 %) and montmorillonite (with the montmorillonite mineral content up to 70 %) clay reinforced by Portland cement with additives of plasticizers of various chemical bases was determined.

*Conclusions.* The significance for the construction industry is that the introduction of polycarboxylate ester into the composition, depending on the type of clay soil and the consumption of Portland cement, led to an increase in ultimate compressive strength of up to 94 %, bending ultimate tensile strength to 76 %, and freeze-thaw resistance to 43 %.

**Keywords:** ultimate compressive strength, ultimate tensile strength, freeze-thaw resistance, clay soil, kaolinite, montmorillonite, water-reducing agent, soil-cement.

### References

1. Plank J., Sakai E., Miao C. W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability // Cement and concrete research. 2015. Vol. 78. P. 81–99.
2. Kamalova Z. A., Yermilova Ye. Yu., Rakhimov R. Z., Stoyanov O. V. Influence of accelerators on the kinetics of hardening of composite cement stone with the addition of super- and hyperplasticizer // Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. Vol. 17. № 15. P. 40–43.
3. Bulanov P. Ye., Vdovin Ye. A., Mavliyev L. F. Influence of plasticizers on physical and mechanical properties of soil-cement for road purpose // Izvestiya KGASU. 2015. № 1 (31). P. 160–164.
4. Valitov N. V., Zorina S. O., Afanas'yeva N. I., Antonov V. A., Sabirov A. A., Chaykin V. G., Meskhi A. M., Glebashev S. G., Zakirova F. A., Luzhbina I. V. Minerageny of the Upper Permian and Mesozoanozoic complexes of the Republic of Tatarstan Kazan : KGU, 2007. 456 p.
5. Vasyanov G. P., Gorbachev B. F., Krasnikova E. V., Sadykov R. K., Kabirov R. R. Clay low-melting ceramic raw materials of the Republic of Tatarstan (the state of the raw material base and the experience of using light-cladding polymineral clays) // Georesursy. 2015. № 4 (63). P. 44–49.
6. Minke G. Clay concrete and its application. M.: Izdatel'stvo yantarnyy skaz, 2004. 232 p.
7. Bulanov P. E., Gimazov A. R., Zamaliev I. R., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Effect of Portland Cement Content on Properties strengthened clay soils of various mineralogical composition // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 20. № 9. P. 24–27.
8. Jaernstrom L., Stenius P. Adsorption of polyacrylate and carboxy methyl cellulose on kaolinite: salt effects and competitive adsorption // Colloids surf. 1990. 50. P. 47–73.
9. Jeknavorian A. A., Jardine L., Ou C. C., Koyata H., Folli K. J. Interaction of superplasticizers with clay-bearing aggregates: special publication AG 7<sup>th</sup> CANMET conference on superplasticizers and other chemical admixtures / Berlin, Germany, 2003. P. 1293–1316.
10. Sakai E., Atarashi D., Daimon M. Interaction between superplasticizers and clay minerals: special publication 1/6<sup>th</sup> CANMET Conference on superplasticizers and other chemical admixtures / China, 2006. P. 1560–1566.
11. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Interactions between superplasticizers and clay minerals // Cem. sci. concr technol. 2004. № 58. P. 387–392.

12. Atarashi D., Sakai E., Obinata R., Daimon M. Influence of clay minerals on fluidity of  $\text{CaSO}_3$  suspension containing comb-type polymer // *Cem. sci. concr. technol.* 2003. № 57. P. 386–391.
13. Tombacz E., Szekeres M. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes // *Appl. clay sci.* 2004. № 27. P. 75–94.
14. Ng S., Plank J. Interaction mechanisms between na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers // *Cement and concrete research.* 2012. № 42. P. 847–854.
15. Amarasinghe P. M., Katti K. S., Katti D. R. Nature of organic fluid-montmorillonite interactions: an FTIR spectroscopic // *J. colloid interface sci.* 2009. № 337. P. 97–105.
16. Burchill S., Hall P. L., Harrison R., Hayes M. H. B., Langford J. I., Livingston W. R., Smedley R. J., Ross D. K., Tuck J. J. Smectite-polymer interactions in aqueous // *Clay minerals.* 1983. № 18. P. 373–397.

УДК 625.72

**Николаева Р.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nikolaeva1@bk.ru](mailto:nikolaeva1@bk.ru)

**Логинова О.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [loginova@kgasu.ru](mailto:loginova@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Оптимизации сети автомобильных дорог

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – определить критерии оптимальности и целевые функции, отражающие требования, предъявляемые к сети автомобильных дорог, и которые способствуют повышению эффективности работы транспорта.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что определен общий принцип и условие построения оптимальной связующей дорожной сети. Наиболее полно удовлетворяющим условием оптимальности является минимум дорожно-транспортных затрат. Принцип оптимальности заключается в том, что всякая изолированная точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие финансовые затраты на перемещение пассажиров и грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в минимизации финансовых затрат, связанных со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети и перемещения по ним транспортных средств.

**Ключевые слова:** сеть автомобильных дорог, автомобильный транспорт, корреспондирующие пункты, математическая модель, маршрут, оптимизация.

#### Введение

Наличие надежной и эффективной транспортной системы является важным фактором в развитии экономики любой страны. Доминирующим видом транспорта во всем мире является автомобильный, который ежегодно стремительно растет. О важности сети автомобильных дорог можно также судить по доле общего объема пассажирских и грузовых перевозок осуществляемых автомобильным транспортом. Исследования зарубежных ученых показали, что автомобильный транспорт является одним из крупнейших вкладов в бюджетные поступления. Например, налоги дорожных пользователей и сборы в США составили \$78 млрд. в 1994 году (6,2 процента федеральных доходов государственного бюджета) и в Соединенном Королевстве \$33 млрд. в 1995-96 (из которых только 10 миллиардов долларов было потрачено на дороги). Удельный вес транспортной системы в основных производственных фондах России составляет 27 %, а существенная доля транспортных услуг в валовом внутреннем продукте составляет 8 %. Чистые финансовые потоки от дорожной отрасли, как правило, положительно коррелирует с экономическим развитием [1].

Сеть автомобильных дорог (дорожная сеть) является сложной, крупномасштабной системой, которая предназначена для обеспечения круглогодичного безопасного движения [2]. Дорожная сеть является основой для функционирования экономики и общества посредством движения людей, товаров и услуг. Сегодня можно сказать о существующем дисбалансе между спросом в транспортной отрасли и предложениями в ней. Транспортные потоки в крупных городах достигают своих предельных значений, и падает пропускная способность дорог [3].

С экономической точки зрения построение дорожной сети должно базироваться на базовой топологии сети, спроса пользователей дорожной сети и стоимостью их строительства. Равновесие наступает тогда когда количество поездок между корреспондирующими пунктами отправления (например, место жительства, место



работы) и пунктами прибытия (местом работы, проживания) равны спросу на поездки с учетом стоимостной политики [4, 5].

Следствием трудности оптимизации дорожной сети можно отметить существующий дисбаланс между научными исследованиями и математическими расчетами, а также наблюдаемыми результатами. В последние годы были разработаны успешные математические и вычислительные методы по формулировке модели динамической транспортной системы. Многие из них обобщают традиционные статистические методы, передовые и реалистичные модели используют симулятор движения, динамику транспортного потока. К числу достаточно апробированных в развитых странах мира программных продуктов для динамических транспортных систем можно отнести: DYNASMART [6], Dynameq [7], AIMSUN [8]. Создания моделей транспортных систем в данных программах представляет собой довольно громоздкую задачу, которая предполагает наличие большого числа элементов и требует длительного процесса калибровка сотни или тысячи коэффициентов.

Цель настоящей статьи – представить сеть автомобильных дорог в виде математической модели и подобрать необходимые условия для оптимизации дорожной сети. Дорожную сеть представим в виде множества корреспондирующих точек (пункты отправления и прибытия), соединенных между собой набором маршрутов. Оптимизация дорожной сети сводится к решению множества одностомных задач, которые занимают решение оптимизации транспортного потока между двумя узлами по маршрутам и получить равновесные распределения транспортного потока в явном виде.

### **1. Фундаментальные решения, концепции и моделей дорожных сетей**

В дорожной сети ожидается, что каждый водитель попытается выбрать наиболее удобный маршрут, и этот выбор будет зависеть от задержек, которые водитель ожидает встретить на разных дорогах; но эти задержки, в свою очередь, будут зависеть от выбора маршрутов, сделанных другими. Такая взаимозависимость затрудняет прогнозирование последствий изменений в системе, таких как строительство новой дороги.

Модель дорожной сети способствует решению множества транспортных задач, которые заключаются в оптимизации транспортной сети при планировании, изменение организации дорожного движения для улучшения условий и т.п.

В 1952 г. Вардроп предложил два принципа равновесия транспортных потоков, которые заключаются в том, что любая транспортная система через определенное время приходит в равновесие [9]:

1. время передвижения по всем используемым маршрутам одинаково для всех участников движения, и меньше времени, которое потратит любой участник движения, изменив свой маршрут;

2. среднее время передвижения является минимальным.

Beckmann, McGuire, и Winsten (1956) впервые математически сформулировали эти условия. В частности, Specifically, Beckmann, McGuire, и Winsten (1956) установили эквивалентность между условиями равновесия транспортной сети, которые утверждают, что все пути, соединяющие пару корреспондирующих пунктов, будут иметь равное и минимальное время поездки (или расходы). Следовательно, в этом случае, равновесие транспортной сети может быть получено, путем решения задачи математического программирования [10]. Такой подход позволил сформулировать, проанализировать и затем решить транспортную задачу на основе фактических транспортных сетей.

Dafermos и Sparrow (1969) придумали термины для транспортной сети «оптимизация – пользователь» и «оптимизация – система». Данные термины различают две ситуации, в первой ситуации пользователи действуют в одностороннем порядке в своих собственных интересах при выборе маршрутов, во второй ситуации пользователи выбирают оптимальные маршруты с общественной точки зрения, с учетом минимальной стоимости в транспортной системе.

Традиционные методы транспортного планирования, включая методы проектирования сетей, сосредоточены на улучшении мобильности на основе таких параметров, как скорость и время в пути. Однако мобильно-ориентированный подход к планированию перевозки можно стимулировать спрос на поездки и привести к затору [11]. Хотя планирование

мобильности может повысить доступность сети, доступность планирования расширяет спектр возможных решений по сравнению с мобильно-ориентированной стратегией [12]. Одним из препятствий является отсутствие методов для решения проблемы доступности напрямую, а не мобильность в транспортировке конструкция сети.

В данной ситуации целью по оптимизации транспортной сети является определение кратчайшего расстояния между корреспондирующими пунктами. Дорожная сеть должна планироваться таким образом, чтобы минимизировать время в пути и финансовых затрат в транспортной системе.

Размещение, плотность и состав дорожной сети складывается под влиянием многочисленных факторов, которые условно можно разделить на три группы: экономические, социальные и природные. При проектировании автомобильных дорог учет этих факторов приводит к необходимости количественной оценки их влияния. Многообразие этих факторов затрудняет эту оценку. Возникает вопрос о выделении наиболее весомых факторов определяющих развитие дорожной сети. Для построения оптимального варианта сети дорог необходимо исследовать влияние каждого фактора на результат решения. Проводить такие исследования в реальных условиях невозможно, т.к. для этого вначале придется построить дороги и только потом провести сравнение. В таких случаях исследования можно проводить на математических моделях. Математическая модель позволит описать исследуемый процесс в виде уравнений и неравенств.

При создании математической модели дорожной сети необходимо в первую очередь определить критерий оптимальности и выбрать целевую функцию, которая отражает требования, предъявляемые к дорожной сети при проектировании.

## 2. Структура дорожной сети

Для описания структуры транспортной сети применяется теория графов, где транспортная сеть представляется в виде ориентированного графа, состоящего из множества последовательно пронумерованных вершин и множества последовательно пронумерованных ребер (дуг), символизирующих элементы и их связи. Граф  $G$ , моделирующий дорожную сеть, обязательно должен быть связанным, чтобы всегда был путь из любой вершины в любую другую вершину. Числа, характеризующие звенья такого графа, обычно выражают протяженность пути, время или стоимость проезда.

Введем обозначения:  $m$  – множество последовательно пронумерованных узлов графа  $G$ ;  $Z$  – множество последовательно пронумерованных дуг графа  $G$ ;  $I$  – множество узлов, являющихся пунктами отправления,  $i \subseteq m$ ;  $J$  – множество узлов, являющихся пунктами прибытия,  $j \subseteq m$ ; подразумевается, что  $i \cap j = \emptyset$ ;  $M_{ij}$  – множество маршрутов между пунктами отправления  $i \in I$  и пунктами прибытия  $j \in J$ .

Граф  $F$ , моделирующий дорожную сеть, определяется множеством вершин и множеством пар вершин, между которыми существует связь (рис. 1).

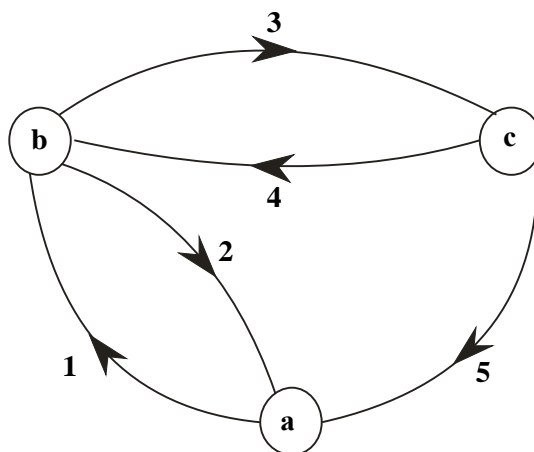


Рис. 1. Модель графа дорожной сети

Рис. 1 иллюстрирует набор из трех узлов, соединенных набором из пяти направленных связей. Мы можем представить узлы, как представляющие города, а связи как представляющие пропускную способность дорог между различными узлами. Двусторонняя дорога представлена двумя звеньями, по одному в каждом направлении. Например, от узла *c* существует два маршрута до узла *a*, водитель может выбрать:

- первый маршрут прямой, по связи 5 (маршрут *ca*);
- второй маршрут проходит через вершину *b* и использует две связи 4, 2 (маршрут *ca2*).

Пусть *Z* – множество звеньев сети дорог и пусть *R* – множество возможных маршрутов. Один из способов описания связи между звеньями сети и маршрутами – это матрица, определяемая следующим образом. Установим,  $A_{zr} = 1$ , если звено *z* лежит на маршруте *r*, и  $A_{zr} = 0$  в противном случае. Это определяет матрицу  $A = (A_{zr}, z \in Z, r \in R)$  называют звено-маршрут матрицы инцидентности. Каждый столбец матрицы соответствует одному из маршрутов *r*, а каждая строка – одному из звеньев *z* сети. Столбец для маршрута *r* состоит из 0 и 1: где 1 показывает, какие звенья сети находятся на маршруте *r*. Строки в матрице, где встречается 1 для звена сети *z*, показывает, какие звенья включены в заданный маршрут. Так, например, матрица инцидентности дорожной сети представленной на рис. 1 будет выглядеть следующим образом:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} ab & ac & ba & bc & ca1 & ca2 & cb1 & cb2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Матрица инцидентности показывает столбец для каждого из двух маршрутов *ca1* и *ca2*, между узлом *c* и *a*. В столбцах закодирована следующая информация: маршрут *ca1* использует звено сети 5, а маршрут *ca2* пользуется звенья сети 4 и 2. Необходимо обратить внимание, что данная матрица инцидентности дорожной сети не сообщает порядок ссылок на маршруте.

Задача в данном случае заключается в том, чтобы решить: включать *k*-е звено в проектируемую сеть или не включать. Количество звеньев *k*-го типа неделимо и может принимать лишь два значения: 0 и 1. Определение неизвестных звеньев сети дорог ( $Z_k$ ), должно удовлетворять условию:

$$Z_k = 0; 1 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

или

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } z \in Z \text{ "входит" в маршрут } M_{ij} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, в качестве критерия оптимальности принять минимум дорожных затрат (затраты на строительство, содержание и ремонт дорожной сети). В данном случае оптимальному варианту будет удовлетворять сеть с наименьшей общей протяженностью, для которых сумма дорожных затрат минимальна:

$$\sum_k D_k l_k = \min, \quad (4)$$

где  $D_k$  – дорожные затраты связанные со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети;

$l_k$  – длина участка дорожной сети;

$k$  – количество участков (звеньев дорожной сети).

Если к дорожной сети предъявляются требования по снижению расходов на транспортную работу или время нахождения в пути пассажиров или грузов, то необходимо обеспечить все транспортные связи самостоятельными дорогами по кратчайшему пути, т.е. непосредственное соединение между собой всех корреспондирующих точек (пункты отправления и прибытия). Решением поставленной задачи является определение неизвестных маршрутов между точками *i* и *j* ( $M_{ij}$ ), удовлетворяющих следующему условию:

$$M_{ij} \geq (i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,m), \quad (5)$$

для которых, транспортная работа на маршруте  $ij$  ( $P_{ij}$ ) или время сообщения между  $i$  и  $j$  ( $t_{ij}$ ) будут минимальны:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} = \min, \tag{6}$$

$$\sum_i \sum_j t_{ij} = \min. \tag{7}$$

Учитывая сложность и практическую ограниченность численного программирования, при решении таких задач можно применять методы комбинаторного анализа, просмотр различных сочетаний значений переменных, но не всех, а лишь разумно выбранной части возможных сочетаний.

Осуществление перевозок с меньшими финансовыми затратами принятыми для оценки оптимальности при проектировании дорожной сети соответствует общему критерию оптимальности для экономики страны. Наиболее полно удовлетворяет условию оптимальности минимума финансовых затрат, изменяющихся с изменением начертания сети:

$$\sum_i \sum_j E_{ij} = \min, \tag{8}$$

где  $\sum_i \sum_j E_{ij}$  – суммарные финансовые затраты, т.е. затраты, связанные со строительством, содержанием и ремонтом дорог и с перемещением транспортных средств на направлениях  $ij$ .

Для выполнения требования (8) необходимо чтобы на каждом из направлений запроектированной сети был обеспечен возможный минимум финансовых затрат, т.е. чтобы:

$$\left. \begin{aligned} E_{1-2} &= \min; \\ E_{1-3} &= \min; \\ &\dots \\ E_{1-n} &= \min; \\ &\dots \\ E_{ij} &= \min. \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Справедливость условия (9) может быть доказана следующим образом. Допустим, существует оптимальная сеть дорог, для которой:

$$\begin{aligned} E_{1-2} &= \min \\ E_{1-3} &= \min \\ &\dots \\ E_{1-n} &= \min \\ &\dots \end{aligned}$$

но

$$E_{ij} \neq \min.$$

Если заменить маршрут, для которого  $E_{ij} \neq \min$ , таким маршрутом, чтобы  $E_{ij} = \min$ , то сумма всех финансовых затрат на сети уменьшится на величину:

$$\Delta = E_{ij} - E'_{ij}, \tag{10}$$

и окажется, что:

$$\sum_i \sum_j E'_{ij} < \sum_i \sum_j E_{ij}. \tag{11}$$

Отсюда следует, что для рассматриваемого случая  $\sum_i \sum_j E'_{ij} \neq \min$  и первоначальное предложение об оптимальности дорожной сети, для которой хоть на одном маршруте  $E_{ij} \neq \min$ , является неверным.

Таким образом, в отличие от первоначального предложения дорожная сеть не может быть оптимальной, если не соблюдается неравенство (11).

Общий принцип построения оптимальной связывающей сети дорог заключается в том, что всякая корреспондирующая точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие удельные дорожно-транспортные затраты на перемещение грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

При составлении математической модели дорожной сети следует исходить из следующих ограничивающих условий:

– оптимальная сеть должна быть связующей, т.е. должна соединять все без исключения корреспондирующие точки (между каждой парой пунктов должен быть хотя бы один маршрут);

– по различным соображениям некоторое звено  $z_k$  должно быть исключено из построения оптимальной сети или, наоборот, обязательно включено в нее.

Это условие выражается равенством (2), при этом транспортно-эксплуатационный уровень проектируемой сети должен быть таким, чтобы скорость движения  $v_{ij}$  между пунктами  $i$  и  $j$  могла быть не менее некоторой заданной скорости  $\bar{v}_{ij}$ , интенсивность движения  $N_{ij}$  не более  $\bar{N}_{ij}$ , коэффициент безопасности движения  $K_{bij}$  не менее  $\bar{K}_{bij}$ .

На основании общего принципа задача сводится к отбору таких звеньев, при которых сформировались бы маршруты, обеспечивающие наименьшие удельные дорожно-транспортные затраты между двумя любыми корреспондирующими точками.

### Выводы

Цель оптимизации дорожной сети заключается в повышении эффективности работы транспорта. Наиболее полно удовлетворяющим условием оптимальности является минимум финансовых затрат, связанных со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети и перемещения по ним транспортных средств. В исследовании этот показатель принят в качестве критерия оптимальности в экономико-математической модели дорожной сети. Следовательно, основное требование, предъявляемое к дорожной сети со стороны автомобильного транспорта, заключается в обеспечении реализации всех обслуживаемых им транспортных связей при наименьших необходимых для этого затратах.

Из рассмотренного примера можно сделать заключение, что основное условие для оптимальных связывающих сетей автомобильных дорог следующее: каждая корреспондирующая точка в оптимальной связывающей сети дорог связана со всеми остальными корреспондирующими точками по направлениям, обеспечивающим наименьшее финансовое затраты, необходимые для перемещения пассажиров и грузов из этой точки в остальные корреспондирующие точки.

Отсюда также вытекает и общий принцип построения оптимальной связующей дорожной сети, которая заключается в том, что всякая изолированная точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие финансовые затраты на перемещение пассажиров и грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

На основании общего принципа задача сводится к отбору таких звеньев, при которых сформировались бы маршруты, обеспечивающие дорожно-транспортные затраты между двумя корреспондирующими точками.

### Список библиографических ссылок

1. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
2. Асанбаев Р. Б., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Проектирование участка автомобильной дороги с применением переходной кривой переменной скорости движения VGV KURVE : сб. ст. IX международной научно-практической конференции – Наука в современном информационном обществе / НИЦ «Академический», 2016. С. 128–132.
3. Волков Д. О., Гаричев С. Н., Горбачев Р. А., Мороз Н. Н. Математическое моделирование нагрузки транспортной сети с целью оценки жизнеспособности построения новых типов сетевых систем // Производство по МФТИ. 2015. вып. 7. № 3. С. 69–77.

4. Гатиятуллин М. Х., Исмагилов А. И. Влияние инновационной деятельности на безопасность дорожного движения // Техника и технология транспорта. 2017. № 1 (1). С. 32–36. URL: [http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin\\_Ismagilov.pdf](http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin_Ismagilov.pdf) (дата обращения: 18.10.2017).
5. Nagurney A., Hensher D. A., Button K. J., Haynes K. E., and Stopher P. R. Spatial Equilibration in Transport Networks, in Handbook of Transport Geography and Spatial Systems, , editors, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2004. P. 583–608.
6. Florian M., Mahut M., Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. New York : Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advances and Challenges. Springer. 2005. P. 1–22.
7. Mahmassani H. S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications // Networks and Spatial Economics. 2001. № 1 (3/4). P. 267–292.
8. Barcelo J. and Casas J. Dynamic Network Simulation with AIMSUN // International Symposium Proceedings on Transport Simulation, Yokohama. Kluwer Academic Publishers. 2002.
9. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proc. Institution of Civil Engineers. 1952. Vol. 2. P. 325–378.
10. Крилатов А. Ю. Оптимальные стратегии управления транспортными потоками в транспортной сети параллельных соединений // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2014. вып. 10. № 2. С. 120–129.
11. Handy S. Planning for accessibility: In theory and in practice // Access to destinations. 2005. P. 131–147.
12. Litman T. Measuring transportation: traffic, mobility and accessibility // ITE Journal. № 73 (10). 2003. P. 28–32.

**Nikolaev R.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [nikolaeva1@bk.ru](mailto:nikolaeva1@bk.ru)

**Loginova O.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [loginova@kgasu.ru](mailto:loginova@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## Optimization of the road network

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the study is to determine the criteria of optimality and objective function that reflects the requirements of the road network and which contribute to improving the efficiency of transport.

*Results.* The main results of the study are that determined a general principle and a condition for constructing an optimal connecting road network. Most fully satisfy the condition of optimality is the minimum traffic cost. The principle of optimality lies in the fact that every isolated point in optimal binding of the road network connected to all the other corresponding points of the links that provides the lowest financial costs of moving passengers and freight from this point to all the other offset point in the network.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is to minimize the financial costs associated with the construction, maintenance and repair of the road network and moving vehicles on them.

**Keywords:** road network, road transport, offsetting the points, mathematical model, routing, optimization.

## References

1. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H. and Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
2. Asanbaev R. B., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Design of the road section with the use of the transition variable speed VGV KURVE : dig. of art. of the IX international scientific-practical conference – Science in the modern information societies / MD-I. TS. «Academic», 2016. P. 128–132.
3. Volkov D. O., Garichev S. N., Gorbachev R. A., Moroz N. N. Mathematic simulation of transport network load with a view to assessing viability of building new types of network systems // *Proizvodstvo po MFTI*. 2015. Vol. 7. № 3. P. 69–77.
4. Gatiyatullin M. H., Ismagilov A. I. The impact of innovative activities on road safety // *Equipment and technology of transport*. 2017. № 1 (1). P. 32–36. URL: [http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin\\_Ismagilov.pdf](http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin_Ismagilov.pdf) (reference date: 18.10.2017).
5. Nagurney A. Spatial Equilibration in Transport Networks, in *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes, Stopher P. R. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2004. P. 583–608.
6. Florian M., Mahut M., Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. *New York : Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advances and Challenges*. Springer. 2005. P. 1–22.
7. Mahmassani H. S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications // *Networks and Spatial Economics*. 2001. № 1 (3/4). P. 267–292.
8. Barcelo J. and Casas J. Dynamic Network Simulation with AIMSUN // *International Symposium Proceedings on Transport Simulation, Yokohama*. Kluwer Academic Publishers. 2002.
9. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proc. Institution of Civil Engineers*. 1952. Vol. 2. P. 325–378.
10. Krilatov A. Yu. Optimal strategies for traffic flow management on the transportation network of parallel links // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. 2014. Vol. 10. № 2. P. 120–129.
11. Handy S. Planning for accessibility: In theory and in practice // *Access to destinations*. 2005. P. 131–147.
12. Litman T. Measuring transportation: traffic, mobility and accessibility // *ITE Journal*. № 73 (10). 2003. P. 28–32.



УДК 533.69.048

**Гумеров А.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [anvar\\_gumerov@list.ru](mailto:anvar_gumerov@list.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Гумеров В.Г.** – кандидат технических наук, доцент

**Самарский государственный технический университет**

Адрес организации: 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194

**Расчет силы, возникающей при движении кругового цилиндра  
в плоскопараллельном потоке, содержащем вихревую нить  
методом присоединенных вихрей**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Требуется определить силу, действующую на круговой цилиндр при его движении в плоскопараллельном потоке, содержащем прямолинейную вихревую нить вблизи цилиндра.

*Результаты.* Показана возможность определения силы и момента, действующего на цилиндр импульсным способом в вихревых точках и интегрированием давления в контрольных точках. Для сравнительного анализа сила также определялась классическим способом, когда непроницаемость контура обеспечивается введением инверсионного вихря.

*Выводы.* Периодические изменения сил и моментов вызывают образование микротрещин в цилиндрических конструкциях. Поэтому они являются исходными данными при расчете элементов конструкций на усталость.

**Ключевые слова:** комплексный потенциал, метод Гаусса, интенсивности присоединенных вихрей, производная интенсивности, аргумент разности координат.

**Введение**

В начальный момент течение около внезапно приведенного в движение кругового цилиндра является безотрывным. Вскоре после начала движения в результате действия сил трения поток отрывается от поверхности и слева и справа образуются по вихревой пелене. Обычно, при расчетах вихревые пелены аппроксимируют дискретными вихрями, и полагают, что дальнейшее движение этих вихрей происходит в идеальной жидкости. Расчет движения вихрей около кругового цилиндра можно проводить классическим способом, когда непроницаемость контура обеспечивается введением в состав комплексного потенциала потенциалов инверсионных вихрей. В случае цилиндра с некруговым контуром применяют либо метод конформного отображения [1-4], либо метод присоединенных вихрей. Теоретические обоснования метода присоединенных вихрей с приведением большого числа примеров излагаются в книге [5].

В настоящей работе рассматривается движение одной вихревой нити с целью изучения особенностей определения силы при расчете обтекания цилиндра с некруговым контуром методом присоединенных вихрей.

**Постановка задачи**

Пусть заданы скорость поступательного потока  $V_\infty$ , радиус цилиндра  $R$  (рис. 1), координаты и интенсивность вихревой нити соответственно  $z_1=r \cdot \exp(i\varphi)$  и  $\Gamma$ . Требуется определить силу, действующую на цилиндр методом присоединенных вихрей.

**Определение интенсивностей присоединенных вихрей**

На контуре цилиндра расположим  $n$  присоединенных вихрей с равными угловыми интервалами  $\Delta\varphi = 2\pi/n$ . Координатами вихрей являются:

$$z_j = R \cdot \exp(i\varphi_j), \text{ где } \varphi_j = j \cdot \Delta\varphi, j = 1, 2, \dots, n.$$

Середины дуг окружности между соседними вихрями примем за контрольные точки (рис. 1). Контрольная точка с номером  $k$  находится в точке:

$$z_k = R \cdot \exp(i\varphi_k), \text{ где } \varphi_k = (k-0,5) \cdot \Delta\varphi, k = 1, 2, \dots, n.$$



Следовательно, вектор  $n_k = \exp(i\varphi_k)$  является единичным нормальным вектором контура в точке  $z_k$ .

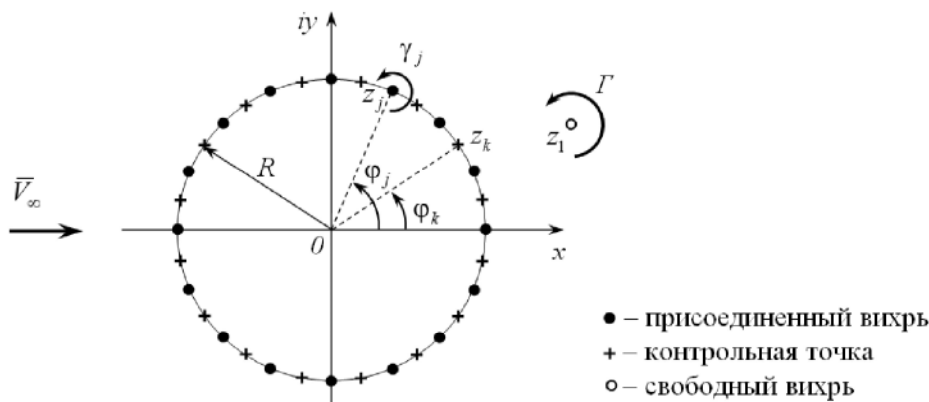


Рис. 1. Расчетная схема

Комплексный потенциал скорости  $W_n$  будет выражаться формулой [3]:

$$W_n = V_\infty z - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \ln(z - z_1) - \sum_{j=1}^n \frac{ig_j}{2p} \cdot \ln(z - z_j), \tag{1}$$

где  $g_j$  – неизвестная интенсивность присоединенного вихря. Интенсивности  $g_j$  будем определять по условию обеспечения нулевой нормальной скорости во всех контрольных точках. Скорость жидкости  $V_k$  и нормальная скорость  $V_k^n$  в контрольной точке  $z_k$  выражаются формулами из (1):

$$V_k = \text{conj}(dW_n / dz|_{z=z_k}) = V_\infty + V_{k\Gamma} + \sum_{j=1}^n g_j V_{kj}, \tag{2}$$

где

$$V_{k\Gamma} = \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{(\bar{z}_k - z_1)}, \quad V_{kj} = \frac{i}{2p} \cdot \frac{1}{(\bar{z}_k - z_j)},$$

$$V_k^n = \Pi p_{n_k} V_k = V_k \cdot n_k = [(V_\infty + \text{Re}(V_{k\Gamma})) \cos f_k + \text{Im}(V_{k\Gamma}) \sin f_k] + \sum_{j=1}^n g_j [\text{Re}(V_{kj}) \cos f_k + \text{Im}(V_{kj}) \sin f_k] = 0.$$

Обозначив в формуле нормальной скорости  $V_k^n$  слагаемое, не содержащее  $g_j$  через  $b_k$ , а сомножитель при неизвестном  $g_j$  через  $a_{kj}$ , составим систему из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными  $g_j$ .

$$\begin{aligned} a_{11} \gamma_1 + a_{12} \gamma_2 + \dots + a_{1n} \gamma_n &= b_1, \\ a_{21} \gamma_1 + a_{22} \gamma_2 + \dots + a_{2n} \gamma_n &= b_2, \\ \dots & \\ a_{n1} \gamma_1 + a_{n2} \gamma_2 + \dots + a_{nn} \gamma_n &= b_n. \end{aligned} \tag{3}$$

Уравнения системы не являются линейно независимыми. Для получения единственного решения к системе добавим еще одну строку и один столбец. Элементы дополнительной строки принимают такие значения:  $b_{n+1} = -\Gamma \cdot d$ ,  $a_{n+1, n+1} = 0$ , а остальные элементы  $a_{n+1, j}$  равны единице. Коэффициентом  $d$  выражается величина вводимой дополнительной циркуляции центрального вихря. Например, если  $d = 0$ , то интенсивность центрального вихря остается без изменения и будет равна интенсивности внешнего вихря, а если  $d = 1$ , то центральный вихрь принимает нулевую интенсивность. По другому, если сумма интенсивностей присоединенных вихрей равна нулю, то такой случай соответствует расчету с центральным вихрем, а если равна  $-\Gamma$ , то расчету без центрального вихря. В дополнительном столбце элемент  $a_{1, n+1}$  примем равным единице, а остальные элементы  $a_{k, n+1}$  полагаем равными нулю.

Решив систему линейных уравнений (3) методом Гаусса, определяем интенсивности присоединенных вихрей  $g_j$ . Поскольку для вычисления силы потребуются

значения производных  $\Phi_j$ , находим измененное положение внешнего вихря за малый промежуток времени  $\Delta t$ :

$$z_1'' = z_1 + V_1 \cdot \Delta t,$$

где

$$V_1 = V_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{ig_j}{2p} \cdot \frac{1}{z_1 - z_j}.$$

Повторно решив систему с новыми координатами  $z_j = z_j''$ , получаем измененные интенсивности  $g_j''$ . Производные интенсивности присоединенных вихрей будут равны:

$$\mathcal{G}_j = (g_j'' - g_j) / \Delta t.$$

### Формулы расчета силы импульсным способом в вихревых точках

Определим импульсным способом силу  $F_u$ , создаваемую присоединенными вихрями. Известно, что в импульсном методе расчета вихревая сила появляется, если вихрь движется относительно потока жидкости [6]. Поскольку скорость движения внешнего вихря равна местной скорости жидкости, этот вихрь силы не создает. Полная скорость жидкости в вихревой точке  $z_j$  выражается формулой:

$$V_j = V_\infty + \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{(z_j - z_1)} + \sum_{m=1}^n \frac{ig_m}{2p} \cdot \frac{1}{(z_j - z_m)}, \quad (m \neq j),$$

а скорость движения самого вихря  $V_j^e$  равна нулю. Следовательно, сила определяется по формуле [7-8]:

$$F_u = -ir \sum_{j=1}^n [(V_j - V_j^e) \cdot g_j - z_j \cdot \mathcal{G}_j] = -ir \sum_{j=1}^n (V_j \cdot g_j - z_j \cdot \mathcal{G}_j),$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

Зная силу, определенную импульсным способом, можно вычислить и крутящий момент, действующий относительно продольной оси цилиндра. При этом следует полагать, что точкой приложения силы является точка инверсии внутри круга, являющаяся точкой, симметричной центру внешнего вихря относительно окружности. Обозначим силу, создаваемую  $j$ -м присоединенным вихрем через  $F_j$ . Разложим силу  $F_j$  на действительную и мнимую части:

$$F_j = -ir(V_j \cdot g_j - z_j \cdot \mathcal{G}_j) = F_{jx} + iF_{jy}.$$

Суммарный крутящий момент будет представляться формулой:

$$M_{кр} = \sum_{j=1}^n (-F_{jx} \sin \varphi + F_{jy} \cos \varphi) R^2 / r.$$

### Формула вычисления силы интегрированием давления в контрольных точках

При вычислении силы интегрированием давления  $p_k$  замечаем, что давление жидкости в контрольной точке  $z_k$  в неустановившемся потоке выражается интегралом Коши-Лагранжа:

$$p_k = p_\infty - \frac{r4V_k^2}{2} - r \left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right|_{t=0},$$

где  $p_\infty$  – давление жидкости на бесконечности,  $V_k$  и  $\partial f_k / \partial t|_{t=0}$  – скорость жидкости и производная потенциала скорости в контрольной точке  $z_k$ , соответственно. Скорость  $V_k$  в два раза меньше скорости, получаемой классическим способом. Поэтому в формуле давления принимается удвоенная скорость (2)  $V_k$ . Определив давления  $p_k$  в контрольных точках можно рассчитать ветровую нагрузку на сооружение [9]. При нахождении производной замечаем, что координаты внешнего вихря  $z_1$  и интенсивность присоединенного вихря  $g_j$  зависят от времени, т. к.  $z_1'' = z_1 + V_1 t$  и  $\gamma_j'' = \gamma_j + \Phi_j t$ .

$$\left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right|_{t=0} = \operatorname{Re} \left( \left. \frac{\partial W_{nk}}{\partial t} \right|_{t=0} \right) = \operatorname{Re} \left( \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{V_1}{z_k - z_1} \right) + \sum_{j=1}^n \operatorname{Re} \left( \frac{-ig_j}{2p} \cdot \ln(z_k - z_1) \right) = \operatorname{Re} \left( \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{V_1}{z_k - z_1} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{g_j}{2p} \cdot \arg(z_{kj}),$$

где  $z_{kj} = z_k - z_j$  при  $\operatorname{Re}(z_k) \geq 0$  и  $z_{kj} = -(z_k - z_j)$  при  $\operatorname{Re}(z_k) < 0$ .

Сила, определяемая интегрированием давления, выражается суммой:

$$F_0 = \sum_{k=1}^n p_k R \cdot \Delta f \cdot \exp(if_k).$$

В этом случае также полагаем, что сила приложена к точке инверсии и момент будет выражаться формулой:

$$M_{кр} = \sum_{k=1}^n p_k \cdot R \Delta f \cdot R^2 / r \sin(f_k - f).$$

### Проведение расчетов и обсуждение результатов

Целью настоящей работы является изучение особенностей расчета силы методом присоединенных вихрей применительно к цилиндрам с некруговым контуром. Например, требуется выяснить, необходимо ли проводить корректировки скоростей при расчетах методом присоединенных вихрей. Используются ли в расчетах аргумента логарифма свойство симметричности точек контура относительно осей  $x$  и  $y$ . Поэтому силы, вычисленные импульсным способом и интегрированием давления, сравнивались не только между собой, но и с силой, определенной классическим методом. При классическом методе силу также можно определить интегрированием давления на поверхности и импульсным способом. При классическом методе непроницаемость контура обеспечивается введением в состав комплексного потенциала скорости  $W$  потенциала инверсионного вихря  $i\Gamma/2\pi \cdot \ln(z - R^2/\bar{z}_1)$ . Тогда комплексный потенциал скорости принимает вид:

$$W = V_\infty \left( z + \frac{R^2}{z} \right) - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \ln(z - z_1) + \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \ln \left( z - \frac{R^2}{\bar{z}_1} \right) - \frac{i\Gamma}{2p} (1-d) \cdot \ln z.$$

Сначала приведем формулы нахождения силы классическим методом путем интегрирования давления на поверхности цилиндра. Скорости  $V_l$  и  $V_{qj}$  соответственно вихревой нити в точке  $z_l$  и точек контура  $z_{\theta j} = R \cdot \exp(i\theta_j)$  выражаются формулами:

$$V_l = V_\infty \left( 1 - \frac{R^2}{\bar{z}_l^2} \right) - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_l - R^2/z_l} - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1-d}{\bar{z}_l}, \quad V_{qj} = V_\infty \left( 1 - \frac{R^2}{\bar{z}_{qj}^2} \right) + \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_{qj} - \bar{z}_1} - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_{qj} - R^2/z_1} - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1-d}{\bar{z}_{qj}}. \quad (4)$$

Давление жидкости в точках контура определяется интегралом Коши-Лагранжа:

$$p_{qj} = p_\infty - r \frac{V_{qj}^2}{2} - r \left. \frac{\partial f_{qj}}{\partial t} \right|_{t=0},$$

где производная потенциала по времени равна

$$\left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right|_{t=0} = \operatorname{Re} \left( \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{V_l}{z_{qj} - z_l} + \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{R^2 \bar{V}_l}{z_{qj} - R^2/\bar{z}_1} \cdot \frac{1}{\bar{z}_l^2} \right).$$

Здесь также рассматривается два случая расчета при двух значениях  $d$ .

1)  $d = 0$  – обтекание цилиндра с центральным вихрем. Тогда в формулах  $V_l$  и  $V_{qj}$  последние слагаемые принимают вид  $-i\Gamma/2\pi \cdot 1/\bar{z}_l$  и  $-i\Gamma/2\pi \cdot 1/\bar{z}_{\theta j}$ .

2)  $d = 1$  – обтекание цилиндра без центрального вихря. В формулах  $V_l$  и  $V_{qj}$  последние слагаемые отсутствуют.

Действующая сила, определяемая классическим способом, путем интегрирования давления выражается суммой:

$$F = - \sum_{j=1}^n p_{qj} R \Delta f \exp(iq_j).$$

Перейдем к выводу формул расчета силы классическим методом с применением импульсного способа. Определим скорость жидкости  $V_{жс}$  в инверсионной точке  $z_{и} = R^2/\bar{z}_l$  и скорость движения инверсионного вихря  $V_в$ . Применяя свойство об одинаковости скоростей жидкости внутри и вне кругового цилиндра в точках, симметричных относительно окружности [10] заключаем, что скорость жидкости в точке инверсии равна скорости внешнего вихря, т.е.  $V_{жс} = V_в$ . Скорость внешнего вихря определяется по формуле (4). Скорость движения инверсионного вихря выражается производной:

$$V_{ви} = d(R^2/\bar{z}_l)/dt = -R^2 \exp(i2\varphi) \cdot \bar{V}_l / r^2.$$

Сила, действующая на вихрь, возникает, если вихрь движется относительно жидкости [4]. Внешний вихрь не движется относительно жидкости и поэтому силы не создает. Сила  $F$  вызвана центральным и инверсионным вихрем.

$$F = -i\rho\Gamma(V_{жц} - V_{вц}) - i\rho\Gamma_u(V_{жци} - V_{вци}), \quad (5)$$

где  $V_{жц}$ ,  $V_{вц}$  и  $V_{жци}$ ,  $V_{вци}$  скорости жидкости и вихря соответственно в центре круга и в точке инверсии. Здесь циркуляция инверсионного вихря равна противоположной интенсивности внешнего вихря, т.е.  $\Gamma_u = -\Gamma_l$ .

Здесь также приведем формулы силы для двух значений  $d$ .

1)  $d = 0$  – интенсивность центрального вихря равна интенсивности внешнего вихря. Формула скорости  $V_1$ , определяемая по (4) принимает вид:

$$V_1 = V_\infty \left( 1 - \frac{R^2}{\bar{z}_1^2} \right) - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_1 - R^2/z_1} - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_1}.$$

Подставив выражения  $V_1$  и  $\bar{V}_1$  в формулу силы (5), получим:

$$F_1 = -ir\Gamma V_\infty + ir\Gamma V_\infty \left( V_1 + \frac{R^2}{r^2} \cdot \exp(i2f) \cdot \bar{V}_1 \right).$$

После некоторых упрощений формула силы принимает окончательный вид:

$$F_1 = -\frac{ir\Gamma V_\infty R^4}{r^4} + \frac{r\Gamma^2 R^2}{2pr^3} \cdot \exp(if).$$

2)  $d = 1$  – случай, когда центральный вихрь отсутствует. Тогда скорость внешнего вихря равна:

$$V_1 = V_\infty \left( 1 - \frac{R^2}{\bar{z}_1^2} \right) - \frac{i\Gamma}{2p} \cdot \frac{1}{\bar{z}_1 - R^2/z_1}.$$

Подставим значения  $V_1$  и  $\bar{V}_1$  в формулу силы (5) и после упрощений получим:

$$F_2 = ir\Gamma V_\infty \left( 1 - \frac{R^4}{r^4} \right) + \frac{r\Gamma^2}{2pr} \cdot \exp(if).$$

Расчеты показывают, что скорости жидкости в контрольных точках, полученные методом присоединенных вихрей в два раза меньше соответствующих скоростей, вычисленных классическим способом. Поэтому в формуле давления принята удвоенная скорость  $V_k$ . Суммарные силы, определенные этими двумя методами путем интегрирования давления совпадают, если аргумент логарифма вычисляется с учетом дополнительных условий. Эти условия связаны со знаком действительной части разности координат ( $z_k - z_j$ ) контрольных и вихревых точек и приводят к правильному результату в случае кругового контура. Однако возникает вопрос о возможности определения силы методом присоединенных вихрей путем интегрирования давления при обтекании тел с некруговым контуром.

Сила, рассчитываемая импульсным способом при обтекании кругового цилиндра с применением метода присоединенных вихрей, совпадает с силой, определяемой классическим методом. При этом в вихревых точках необходимо принять не касательную, а полную скорость жидкости. Заметим, что в вихревых точках полная скорость имеет некоторую нормальную составляющую.

Приведенные рассуждения справедливы как для случая обтекания с центральным вихрем, так и без него. На основании этих рассуждений можно полагать, что при обтекании тел с некруговым контуром расчет силы импульсным способом приведет к правильному результату.

## Выводы

Показана возможность определения силы и момента, действующего на конструкцию кругового сечения в потоке жидкости в присутствии вихря импульсным способом и интегрированием давления. Как правило, за обтекаемыми конструкциями происходит периодический сброс вихрей, что приводит к периодическим изменениям действующих сил и моментов, вызывающие, со временем, образование микротрещин и разрушение таких конструкций. Поэтому они являются исходными данными при расчете элементов конструкций на усталость.

### Список библиографических ссылок

1. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе И. В. Теоретическая гидромеханика. М. : ОГИЗ, 1948. Ч. 1. 535 с.
2. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М. : Наука, 1973. 749 с.
3. Лойсянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
4. Милн-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика. М. : Мир, 1964. 670 с.
5. Белоцерковский С. М., Ништ М. И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М. : Наука, 1978. 352 с.
6. Сэффмэн Ф. Дж. Динамика вихрей. М. : Научный мир, 2000. 375 с.
7. Bryson A.E. Symmetric vortex separation on circular cylinders and cones // J. of Applied Mechanics. 1959. Vol. 26. № 4. P. 643–648.
8. Гумеров А.В. Расчет движения вихревой нити вокруг кругового цилиндра методом дискретных вихрей // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (33). С. 433–439.
9. Зиннуров Т. А., Каюмов Р. А., Манапов А. З. О чувствительности результатов статистического моделирования постоянных и ветровых нагрузок на сооружения к отклонениям параметров их законов распределений // Известие ВУЗов. Строительство. 2012. № 1. С. 132–136.
10. Гумеров В.Г. Скорость жидкости внутри кругового цилиндра, находящегося в плоскопараллельном потоке // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. № 2. С. 28–31.

**Gumerov A.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [anvar\\_gumerov@list.ru](mailto:anvar_gumerov@list.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Gumerov V.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Samara State Technical University**

The organization address: 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244

### Calculation of the force arising when a circular cylinder moves in a plane-parallel flow containing a vortex filament by the method of associated vortices

#### Abstract

*Problem statement.* It is required to determine the force acting on a circular cylinder when it moves in a plane-parallel flow containing a rectilinear vortex filament near the cylinder.

*Results.* The possibility of determining the force and torque is shown, acting on the cylinder as vertical points and integrating the pressure at the control points. For comparative analysis, the force was also determined by the classical method, when the impenetrability of the contour is provided by the introduction of an inversion vortex.

*Conclusions.* Periodic changes in forces and moments cause the formation of microcracks in cylindrical structures. Therefore, they are the initial data in the calculation of structural elements for fatigue.

**Keywords:** the complex potential, the Gauss method, the intensity of the attached vortices, the intensity derivative, the coordinate difference argument

#### References

1. Kochin N. E., Kibel I. A., Roze I. V. Theoretical hydromechanics M. : OGIЗ, 1948. V 1. 535 p.
2. Lavrent'yev M. A., Shabat B. V. Methods of the theory of functions of a complex variable. M. : Nauka, 1973, 749 p.

3. Loysyanskiy L. G. Mechanics of fluids and gas. M. : Drofa, 2003. 840 p.
4. Milne-Thomson L. M. Theoretical hydrodynamics. M. : Mir, 1964. 670 p.
5. Belotserkovsky S. M., Nisht M. I. Separated and unseparated flow around thin wings of an ideal fluid. M. : Nauka, 1978. 352 p.
6. Saffman P. G. Vortex dynamics. M. : Nauchny mir, 2000. 375 p.
7. Bryson A. E. Symmetric vortex separation on circular cylinders and cones // J. of Applied Mechanics. 1959. Vol. 26. № 4. P. 643–648.
8. Gumerov A. V. Calculation of the movement of vortex filament around the circular cylinder using the method of discrete vortices // Izvestiya KGASU. 2015. № 4 (33). P. 433–439.
9. Zinnurov T. A., Kayumov R. A., Manapov A. Z. On the sensitivity of the results of statistical modeling of constant and wind loads on structures to deviations of the parameters of their distribution laws // Izvestiye vuzov. Stroitel'stvo. 2012. № 1. P. 132–136.
10. Gumerov V. G. The velocity of a fluid inside a circular cylinder located in a plane-parallel flow // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. 2017. № 2. P. 28–31.

УДК 539.3

**Хамитов Т.К.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: tagirkx@yandex.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Хасанов А.Р.** – инженер ПТО

E-mail: hasanov-1994@yandex.ru

**ООО «Завод ЖБИ «Кулонстрой»**

Адрес организации: Россия, г. Казань, ул. Гвардейская, д. 53

## Динамическое выпучивание цилиндрической оболочки при осевом ударе

### Аннотация

*Постановка задачи.* Рассматриваются задачи динамической устойчивости упругой и упруго-пластической цилиндрической оболочки при продольном ударе. Известно, что при ударных нагрузках, превышающих статическое критическое значение, формы потери устойчивости отличаются от статических. Рассмотрены два вида нагружения оболочки: мгновенное приложение и линейное возрастание напряжения в функции времени.

*Результаты.* Исследуются осесимметричные формы движений, для определения длин полуволн используется статический критерий устойчивости. Для двух видов нагружения получены критические длины полуволн в зависимости от коэффициента динамичности. Предполагается, что выпучивание происходит при первом прохождении продольной волны вдоль оболочки и в этом случае оболочку можно считать полубесконечной. В случае мгновенного приложения нагрузки к упругой оболочке показана связь между статическим критерием и критерием Лаврентьева-Ишлинского.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что для оболочки средней длины значения критических длин полуволн сильно зависят от характера напряженного состояния за фронтом продольной волны.

**Ключевые слова:** цилиндрическая оболочка, потеря устойчивости, статический критерий, полуволна.

Работы [1-4], посвященные устойчивости упругой и упруго-пластической цилиндрической оболочки при продольном ударе, позволяют сделать следующие выводы:

1) если время приложения нагрузки на торце меньше времени пробега продольной волны до противоположного торца, то критическая нагрузка практически не зависит от длины оболочки. При этом длина оболочки должна составлять в несколько статических полуолн потери устойчивости;

2) для расчета достаточно рассмотреть шарнирно опертую оболочку, так как граничные условия влияют на значения критических нагрузок лишь для коротких оболочек, сравнимых с длиной статических полуолн.

В этих работах для определения критических нагрузок использовался статический критерий (равенство нулю частоты поперечных колебаний). В частном случае, когда к торцу упругой оболочки прикладывается постоянная нагрузка, статический критерий приводит верхней статической критической нагрузке [1, 2]. Однако при ударе нагрузка может в несколько раз больше, чем статическое критическое значение и формы потери устойчивости отличаются от статических [6]. В данной работе определяются длины полуолн, когда оболочка прикладывается нагрузка, больше статической критической.

### 1. Упругая оболочка

Пусть к одному из торцов оболочки прикладывается ударная нагрузка  $\sigma$ , законы изменения которой показаны на рис. 1: нагрузка прикладывается мгновенно (рис. 1а) или линейно возрастает во времени (рис. 1б). Если предполагать [1-4], что выпучивание происходит при первом пробеге продольной волны вдоль оболочки, то оболочку можно считать переменной длины, т.е. полубесконечной. Кроме того, на фронте продольной волны примем условия шарнирного опирания.

Уравнение осесимметричных поперечных движений оболочки запишем в виде:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial}{\partial x} \left( S(x) h \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{Eh}{R^2} w + hr \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \tag{1}$$

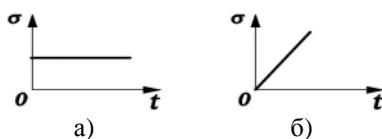


Рис. 1. Законы изменения нагрузки в зависимости от времени

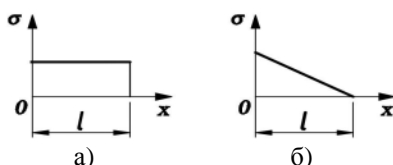


Рис. 2. Эпюры продольных сжимающих напряжений вдоль оболочки: а) при мгновенном нагружении; б) при линейном изменении нагрузки

Все обозначения в уравнении (1) общепринятые. Сжимающие напряжения  $\sigma(x)$  зависят от вида приложения нагрузки и находятся из решения уравнения продольных движений.

**1.1.** Рассмотрим сначала мгновенное приложение нагрузки. В этом случае напряжения по длине оболочки постоянны и уравнение (1) получается с постоянными коэффициентами:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + Sh \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{Eh}{R^2} w + hr \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \tag{2}$$

Решение (2) запишем в виде:

$$w(x,t) = A(t) \sin\left(\frac{m\pi x}{l}\right), \quad (m=1, 2, 3, \dots). \tag{3}$$

Подставляя (3) в уравнение (2) после интегрирования получим:

$$r h \frac{d^2 A(t)}{dt^2} + A(t) \left( D \frac{m^4 \pi^4}{l^4} - S h \frac{m^2 \pi^2}{l^2} + \frac{Eh}{R^2} \right) = 0. \tag{4}$$

где  $D = Eh^3 / (12(1-\nu^2))$  – цилиндрическая жесткость оболочки.

Решение уравнения (4) представим в виде:

$$A(t) = Be^{\omega t}, \quad \text{где } B = \text{const}. \tag{5}$$

Подставляя (5) в уравнение (4) для показателя экспоненты получим:

$$\omega^2 = \left( D l^4 - S h l^2 + \frac{Eh}{R^2} \right) / r h. \tag{6}$$

Здесь  $\lambda = m\pi/l = \pi/l_m$ ,  $l_m = l/m$  – длина полуволны потери устойчивости.

Если воспользоваться статическим критерием устойчивости, полагая  $\omega=0$  в (6), для критического напряжения и полуволны соответственно получим:

$$S = S_{cm} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{h}{R}, \tag{7}$$

$$l_m = \frac{p \sqrt{Rh}}{\sqrt[4]{12(1-\nu^2)}}. \tag{8}$$

Отсюда видно, что статический критерий приводит к классическим выражениям для напряжений и длин полуволн. Длина сжатого участка оболочки (критическая длина), начиная с которой становится возможна потеря устойчивости по статическому критерию, для рассматриваемого случая равна длине полуволны ( $m=1$ ). Определим из уравнения (6)



критическую длину полуволны, когда к торцу оболочки приложены напряжения, превосходящие  $\sigma_{cm}$  ( $\sigma > \sigma_{cm}$ ):

$$DI^4 - shl^2 + \frac{Eh}{R^2} = 0. \tag{9}$$

Корни уравнения (9) будут иметь следующий вид:

$$I_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{\frac{s \pm \sqrt{s^2 - s_{cm}^2}}{2D}}. \tag{10}$$

Действительный корень уравнения (9), соответствующей наименьшей длине полуволны имеет вид:

$$I = \sqrt{\frac{s + \sqrt{s^2 - s_{cm}^2}}{2D}},$$

отсюда критическая длина полуволны:

$$l_m^{cm} = \frac{ph}{\sqrt{6(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{E}{s + \sqrt{s^2 - s_{cm}^2}}} \tag{11}$$

или

$$l_m^{cm} = \frac{p\sqrt{Rh}}{\sqrt[4]{12(1-\nu^2)}} \frac{1}{\sqrt{k + \sqrt{k^2 - 1}}}, \tag{12}$$

где  $k = \frac{s}{s_{cm}}$  – коэффициент динамичности.

Если воспользоваться критерием Лаврентьева-Ишлинского, оболочка выпучивается по полуволнам, имеющим максимальный темп возрастания амплитуды. Отыскивая экстремум функции  $\omega^2$  по числу полуволн  $m$ , из (6) получим:

$$2D\lambda^2 - \sigma h = 0$$

или

$$\lambda^2 = \sigma h / 2D. \tag{13}$$

Для длины полуволны выпучивания  $l_m^{din} = p/I$  получаем:

$$l_m^{din} = p \sqrt{\frac{2D}{sh}}. \tag{14}$$

Полуволны, длины которых вычисляются по формуле (14), будут обладать наибольшей скоростью возрастания амплитуды. Если сравнить критические длины полуволн, определяемые по формулам (12) и (14), то приходим к формуле:

$$\left(\frac{l_m^{cm}}{l_m^{din}}\right)^2 = 1 + \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}. \tag{15}$$

На рис. 3 приведено сравнение критических длин полуволн, полученных по двум критериям, в зависимости от коэффициента динамичности  $k$ . На графике обозначено:  $n = l_m^{cm} / l_m^{din}$ . Из рисунка видно, что квадрат отношения критических длин полуволн быстро стремится к 2.

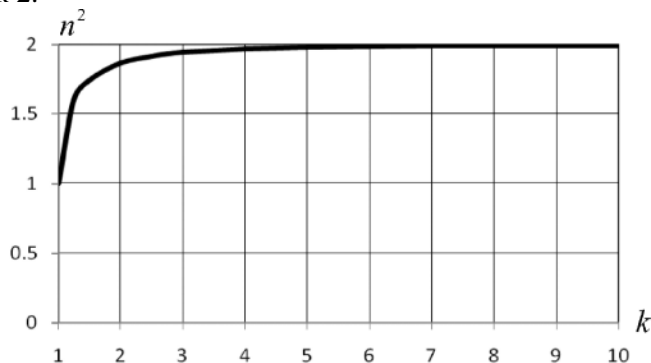


Рис. 3. Зависимость критических длин полуволн от коэффициента динамичности  $k$

1.2. В случае линейного возрастания нагрузки, сжимающие напряжения по длине оболочки представим в виде ряда:

$$s(x) = s \left( 1 - \frac{x}{l} \right) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(I_k x), \quad I_k = \frac{pk}{l}. \tag{16}$$

$$a_0 = \frac{s}{2}, \quad a_k = \frac{2s}{p^2 k^2} (1 - \cos(pk)), \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

Представим решение уравнения (1) в виде:

$$w(x, t) = e^{wt} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \sin(I_k x), \quad I_k = \frac{pk}{l}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \tag{17}$$

Подставляя (16)-(17) в (1), после некоторых преобразований получим бесконечную систему однородных алгебраических уравнений относительно  $f_k$ :

$$f_k \Omega_k + \sum_{i=k+1}^{\infty} f_i a_{ki} + \sum_{i=1}^{k-1} f_i a_{ki} = 0, \quad (k = 1, 2, 3, \dots). \tag{18}$$

где  $a_{kk} = \Omega_k = 2DI_k^4 - I_k^2 (2a_0 + a_{2k}) + 2Eh/R^2 + 2rhw^2$  при  $i = k$ ,

$$a_{ik} = a_{ki} = -\lambda_i \lambda_k (a_{i-k} + a_{i+k}) \text{ при } i \neq k.$$

Согласно статическому критерию устойчивости [7, 8] длина полуволны определяется как наименьший корень уравнения:

$$\det \|a_{ik}\| = 0. \tag{19}$$

Для примера рассмотрена оболочка с параметрами  $R/h = 600$ ;  $h = 0,05 \text{ см}$ ;  $\nu = 0,3$ . Результаты расчета для двух видов нагружения показаны на рис. 4.

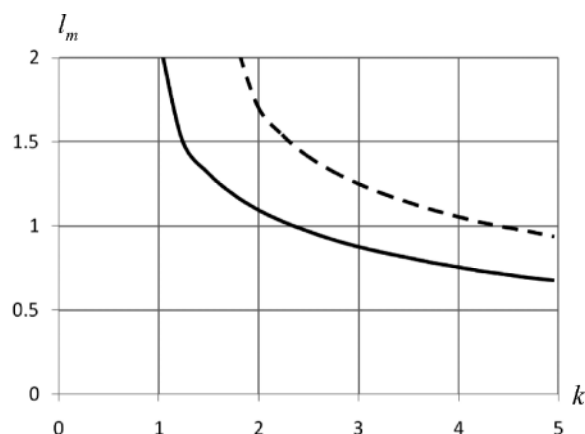


Рис. 4. Зависимость критических длин полуволн  $l_m$  (см) от коэффициента динамичности  $k$ : сплошная линия соответствует мгновенному нагружению оболочки, штриховая – линейному

## 2. Упруго-пластическая оболочка

Рассмотрим оболочку, к торцу которой прикладывается напряжение  $\sigma_0$ , превышающее предел пропорциональности материала  $\sigma_s$ . Для материала примем диаграмму сжатия с линейным упрочнением [10]. В отличие от работ [3, 8], где находились напряжения в зависимости от длины сжатого участка, здесь определим длины полуволн, задаваясь напряжениями на торце. При этом напряженное состояние оболочки по длине при двух случаях нагружения будем считать известным [3]. На рис. 5 показаны эпюры продольных напряжений для двух случаев нагружения. На рис. 5а:  $l_1$  – длина участка, где напряжения равны  $\sigma_0$ ,  $l_2$  – длина участка, где напряжения равны пределу пропорциональности материала  $\sigma_s$ . Между длинами участков имеют место соотношения:

$$l = a_0 t, \quad l_1 = a_1 t, \quad l = l_1 + l_2, \quad l_1 = l \frac{a_1}{a_0} = l \sqrt{\frac{E_k}{E}}, \quad l_2 = l \left( 1 - \sqrt{\frac{E_k}{E}} \right). \tag{20}$$

Выражения для длин по рис. 5б запишутся в виде:

$$l_1 = l \sqrt{\frac{E_k}{E}} \left( 1 - \frac{s_s}{s_0} \right), \quad l_2 = l \left( 1 - \sqrt{\frac{E_k}{E}} \right) \left( 1 - \frac{s_s}{s_0} \right), \quad l_3 = l \frac{s_s}{s_0}. \tag{21}$$

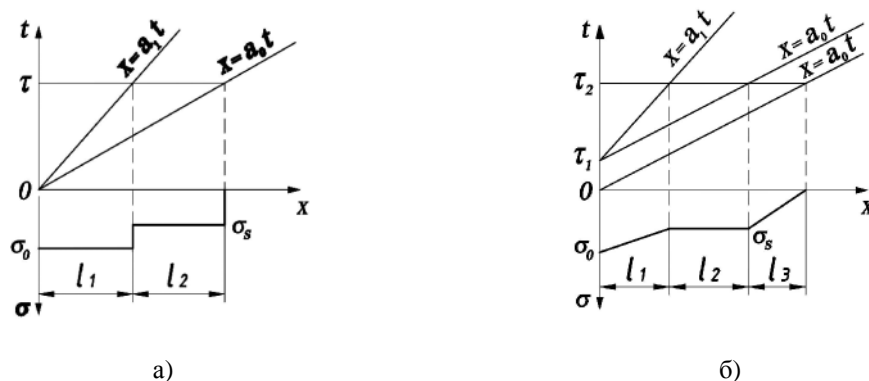


Рис. 5. Распространение продольных волн и напряженное состояние по длине оболочки: а) при мгновенном приложении напряжения; б) при линейном возрастании напряжения

Уравнение возмущенного движения оболочки запишем в виде [8, 10]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( (D_2 - D_3) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \frac{B_2}{2R} + s_i h \right) \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{3B_1}{4R^2} w + r h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \tag{22}$$

2.1. Рассмотрим первый вид нагружения. Запишем выражения для коэффициентов  $B_1, B_2, D_2, D_3$ :

$$D_2 - D_3 = \begin{cases} \frac{E_c + 3E_k}{36} h^3 & \text{при } 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{E + 3E_k}{36} h^3 & \text{при } l_1 < x \leq l. \end{cases} \tag{23}$$

$$B_1, \left( \frac{B_2}{2R} + s_i h \right) = \begin{cases} \frac{4}{3} E_c h, \quad \frac{h^2}{2} (E_c - E_k) + s_0 h & \text{при } 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{4}{3} E h, \quad \frac{h^2}{2} (E - E_k) + s_s h & \text{при } l_1 < x \leq l. \end{cases} \tag{24}$$

Здесь  $E, E_k, E_c$  – упругий, касательный и секущий модули.

Коэффициенты (5) и (6) представим в виде рядов:

$$(D_2 - D_3) = \sum_{k=0}^{\infty} d_k \cos(I_k x), \tag{25}$$

$$\left( \frac{B_2}{2R} + s_i h \right) = \sum_{k=0}^{\infty} b_k \cos(I_k x), \tag{26}$$

$$\frac{3B_1}{4R^2} = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cos(I_k x), \tag{27}$$

где

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{h^3}{36l} [(E_c - E)l_1 + (3E_k + E)l], & d_k &= \frac{h^3}{18pk} [(E_c - E)\sin(I_k l_1)], \\ b_0 &= \frac{h}{l} \left[ \left( \frac{h}{4R} (E_c - E) + s_0 - s_s \right) l_1 + \left( \frac{h}{4R} (E - E_k) + s_s \right) l \right], \\ b_k &= \frac{2h}{pk} \left[ \left( \frac{h}{4R} (E_c - E) + s_0 - s_s \right) \sin(I_k l_1) \right], \\ c_0 &= \frac{h}{R^2 l} [E(l - l_1) + E_c l_1], & c_k &= \frac{2h}{R^2 pk} (E_c - E) \sin(I_k l_1). \end{aligned}$$

Решение уравнения (4) ищем в виде (17). Подставляя (17), (25)-(27) в (22) получим бесконечную систему (18). Элементы определителя (19) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} a_{kk} &= I_k^4 (2d_0 - d_{2k}) - I_k^2 (2b_0 + b_{2k}) + 2c_0 - c_{2k} + 2rhw^2 & \text{при } i = k, \\ a_{ik} &= a_{ki} = I_i^2 I_k^2 (d_{i-k} - d_{i+k}) - I_i I_k (b_{i-k} + b_{i+k}) + c_{i-k} - c_{i+k} & \text{при } i \neq k. \end{aligned}$$

2.2. Во втором случае нагружения оболочка по длине разбивается на три зоны с разными значениями напряжений в каждой зоне (рис. 5б). Коэффициенты  $B_1, B_2, D_2, D_3$  имеют вид:

$$(D_2 - D_3), B_1 = \begin{cases} \frac{E_c + 3E_k}{36} h^3, & \frac{4}{3} E_c h, & \text{при } 0 \leq x \leq l_1, \\ \frac{E + 3E_k}{36} h^3, & \frac{4}{3} E h & \text{при } l_1 < x \leq l_1 + l_2, \\ \frac{E h^3}{12(1-n^2)}, & \frac{4}{3} E h & \text{при } l_1 + l_2 < x \leq l. \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{B_2}{2R} + s_i h = \begin{cases} \frac{h^2}{4R} (E_c - E_k) + s_s h + \frac{(s_0 - s_s)}{l_1} (l_1 - x) h & \text{при } 0 \leq x \leq l_1, \\ \frac{h^2}{4R} (E - E_k) + s_s h & \text{при } l_1 < x \leq l_1 + l_2, \\ s_s \frac{(b-x)}{l_3} h & \text{при } l_1 + l_2 < x \leq l. \end{cases} \quad (29)$$

Коэффициенты рядов (25)-(27) примут вид:

$$d_0 = \frac{h^3}{36l} \left[ (E_c - E) l_1 + (3E_k + E)(l - l_3) + \frac{3El_3}{1-n^2} \right],$$

$$d_k = \frac{h^3}{18pk} \left[ (E_c - E) \sin(I_k l_1) + \left( 3E_k + E - \frac{3E}{1-n^2} \right) \sin(I_k (l - l_3)) \right],$$

$$b_0 = \frac{h}{2l} \left[ \left( \frac{h}{2R} (E_c - E) + s_0 - s_s \right) l_1 + \left( \frac{h}{2R} (E - E_k) + s_s \right) (l - l_3) + s_s l \right],$$

$$b_k = \frac{2h}{pk} \left[ \frac{h}{4R} (E_c - E) \sin(I_k l_1) + \frac{h}{4R} (E - E_k) \sin(I_k (l - l_3)) + \frac{s_0}{pk} \sqrt{\frac{E}{E_k}} (1 - \cos(I_k l_1)) + \frac{s_0}{pk} (\cos(I_k (l - l_3)) - \cos(pk)) \right],$$

$$c_0 = \frac{h}{R^2 l} [El + (E_c - E)l_1], \quad c_k = \frac{2h}{R^2 pk} (E_c - E) \sin(I_k l_1).$$

Результаты расчета для оболочки из дюралюминия Д16Т представлены на рис. 6, 7. Параметры оболочки:  $E=7,5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$ ,  $\sigma_s=2000 \text{ кг/см}^2$ . Приведенные графики показывают, что критические длины полуволн существенно зависят как от характера нагружения, так и принятой диаграммы сжатия (секущего и касательного модулей) материала оболочки.

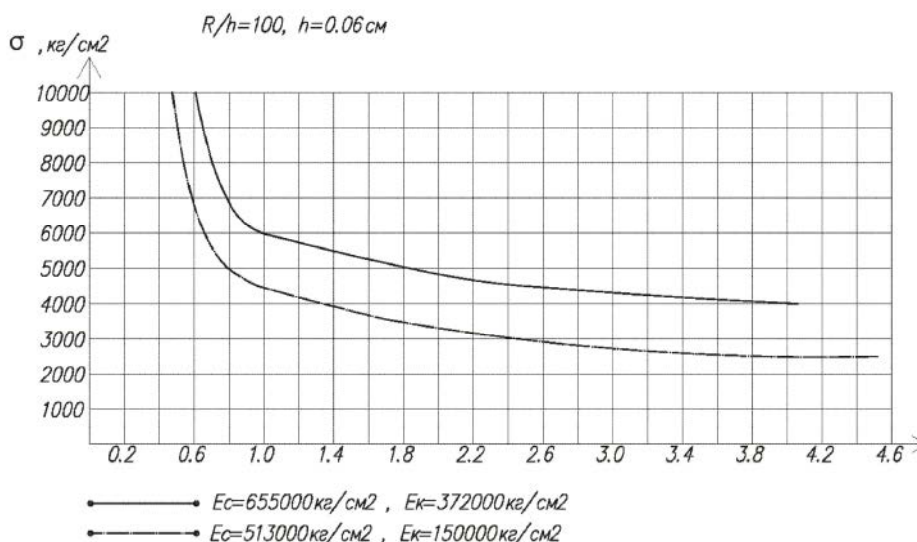


Рис. 6. Зависимость критических длин от напряжений при линейном возрастании напряжения на ударяемом торце оболочки



**Khamitov T.K.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [tagirkx@yandex.ru](mailto:tagirkx@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Khasanov A.R.** – engineer of DTD

E-mail: [hasanov-1994@yandex.ru](mailto:hasanov-1994@yandex.ru)

**LTD «Zavod ZBI «Culonstroy»**

The organization address: Russia, Kazan, Gvardeyskaya st., 53

### Dynamic buckling of cylindrical shell under axial impact

#### Abstract

*Problem statement.* Discusses the problem of dynamic stability of elastic and elastic-plastic cylindrical shell under longitudinal impact. It is known that under shock loads greater than the static critical value, the buckling modes are different from static. We considered two types of loading sheath: instant app and the linear increase in the voltage as a function of time.

*Results.* Examines the axisymmetric forms of the movements. For the determination of half wavelengths using a static criterion of stability. For two types of loading is obtained the critical length of half wavelengths depending on the dynamic factor. It is assumed that buckling occurs in the first pass of the longitudinal wave along the shell, and in this case, the shell can be considered semi-infinite. In the case of instantaneous application of the load to the elastic shell shows the relationship between the static criterion and the criterion of Lavrentiev-Ishlinskii.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is that for the shell of a medium length of critical half wavelengths strongly depend on the nature of the stress state behind the front of the longitudinal wave.

**Keywords:** cylindrical shell, buckling, static criterion, the half-wave.

#### References

1. Khamitov T. K., Shigabutdinov F. G. On the buckling of elastic cylindrical shells under longitudinal compression force impact type // Vestnik IrGTU. 2010. № 3 (43). P. 70–76.
2. Shigabutdinov F. G., Khamitov T. K. Because the determination of the critical efforts of the buckling of elastic cylindrical shells under longitudinal compression forces impact type // Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva, 2011. № 2. P. 85–92.
3. Khamitov T. K. On stability of elastic-plastic cylindrical shell under longitudinal impact // Izvestiya KGASU. 2016. № 4 (38). P. 490–496.
4. Khamitov T. K. Stability of elastic-plastic cylindrical shell under longitudinal impact : dig. of art. of the international scientific and technical conference – Mathematical methods and models: theory, applications and role in education / USTU. Ulyanovsk, 2014. P. 257-261.
5. Mukhutdinov R. F., Shigabutdinov F. G. The influence of local defects of wave generation in orthotropic cylindrical shells of finite length under longitudinal impact // Vestnik MGSU. 2013. № 10. P. 60–67.
6. Lavrent'ev M. A., Ishlinsky A. Yu. Dynamic forms of loss of stability of elastic systems // DAN USSR 1949. v. 64. № 6. P. 779–782.
7. Movsisyan L. A. On the buckling of cylindrical shells under longitudinal impact // Izvestiya AN Armyanskoy SSR. Seriya fiz.-mat. nauk. 1964. v. 17. № 6. P. 57–64.
8. Arakelyan A. E., Movsisyan L. A. On elastic-plastic stability of rod and cylindrical shell under longitudinal intensive loads // Izvestiya AN Armyanskoy SSR. Seriya fiz.-mat. nauk. 1987. v. 40. № 5. P. 3–13.
9. Movsisyan L. A. On the stability of elastoplastic rods under impact loads // Izvestiya AN Armyanskoy SSR. Seriya fiz.-mat. nauk. 1986. vol. 39. № 2. P. 15–23.
10. Korolev V. I. Elastic-plastic deformation of shells. M. : Mashinostroenie, 1971. 304 p.



УДК 621.928.9

**Замалиева А.Т.** – инженер

E-mail: [Albina-0587@rambler.ru](mailto:Albina-0587@rambler.ru)

**ООО «Газпром трансгаз Казань»**

Адрес организации: 420000, Россия, г. Казань, ул. А. Кутуя, д. 41

**Зиганшин М.Г.** – доктор технических наук, доцент

E-mail: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru)

**Потапова Л.И.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждении мелкодисперсных частиц классов $PM_{10}$ , $PM_{2,5}$

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Целью работы является усовершенствование циклонных и фильтрующих пылеуловителей посредством повышения эффективности осаждения мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  с одновременным снижением энергетических и материальных затрат.

*Результаты.* Проведен анализ существующих способов циклонной фильтрации производственных дисперсных выбросов. Выполнен численный эксперимент на основе методов вычислительной гидродинамики. Произведены стендовые испытания циклонного фильтра на базе серийного циклона ЦН-11-200, найдены аэродинамические характеристики его работы.

*Выводы.* Результаты испытаний циклона с фильтрующей вставкой показали повышение эффективности очистки газа при незначительном увеличении затраты энергии.

**Ключевые слова:** циклон, фильтр, сепарация, степень очистки, численное моделирование.

При современных требованиях к чистоте атмосферного воздуха одноступенчатая обработка технологических выбросов в большинстве случаев не может обеспечить необходимую степень его очистки при приемлемых энергетических показателях. В последнее время ужесточаются нормативы по содержанию в атмосферном воздухе взвешенных частиц с размерами менее 10 мкм. Соответственно возрастают требования к очистке гетерогенных газовых выбросов от высокодисперсных компонентов [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения, взвешенные частицы размером менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) и менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ), содержащиеся в атмосферном воздухе, наносят намного больший вред организму человека, чем более крупные частицы. По влиянию на здоровье населения их относят к наиболее значимым загрязнителям воздуха. Для эффективной обработки современных производственных выбросов, содержащих частицы классов  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ , необходима многоступенчатая система очистки с очистными устройствами, оптимально учитывающими физико-химические свойства гетерогенных и гомогенных загрязнителей выброса, а также его нейтральной части [2]. В данной работе представлены результаты исследования аппарата, совмещающего ступени грубой и финишной очистки гетерогенных выбросов с частицами классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ .

Сообразно с известной энергетической теорией очистки гетерогенных выбросов и соответствующим ей энергетическим методом расчетов инерционных пылеулавливающих устройств, их эффективность повышается с увеличением энергозатрат на очистку. Однако при этом необходимо принимать во внимание только затраты, непосредственно связанные с задержанием взвешенных частиц. Выполненный с этой позиции анализ существующих устройств циклонной фильтрации производственных дисперсных выбросов (рис. 1) показал следующее. Устройства, обладающие высокой степенью осаждения частиц классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , одновременно являются материало- и энергозатратными. Аппараты же с низким сопротивлением, и,

соответственно, энергоэффективные, имеют невысокую степень осаждения частиц указанных классов. Так, например, конструкция пылеуловителя ПУМА (рис. 1а) обеспечивает высокую производительность по воздуху, малое аэродинамическое сопротивление, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, однако высокая степень очистки не достигается [3].

В двухступенчатом комбинированном фильтре-сепараторе (рис. 1б), предназначенном для фильтрации жидкости [4], совмещены две ступени очистки. В нем первой ступенью служит циклонная часть, состоящая из завихрителя с соплом и кольцевого цилиндрического канала, образованного корпусом фильтра и сеткой; второй ступенью – цилиндрический сетчатый фильтроэлемент, обеспечивающий высокую степень очистки. В то же время движение жидкости через него требует высоких энергетических затрат, а при касательном натекании сопротивлению еще более увеличивается.

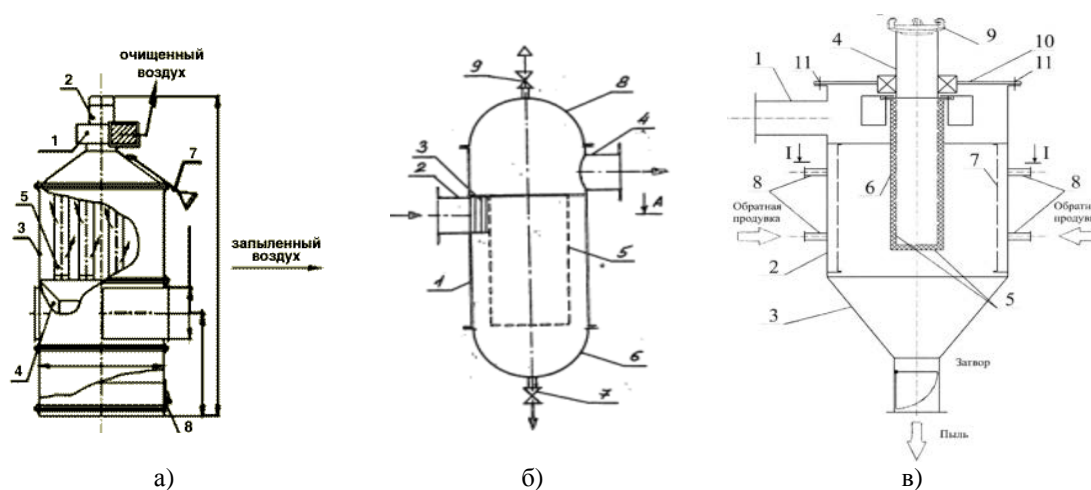


Рис. 1. Устройства для циклонной фильтрации гетерогенных выбросов:

- а – конструкция пылеуловителя ПУМА: 1 – вентилятор, 2 – электродвигатель вентилятора, 3 – корпус, 4 – сухой циклон, 5 – фильтр тонкой очистки, 6 – входной патрубок, 7 – штуцер, 8 – бункер; б – двухступенчатый комбинированный фильтр-сепаратор для фильтрации жидкости: 1 – корпус; 2 – подводящий патрубок; 3 – сопло; 4 – отводящий патрубок; 5 – сетчатый фильтроэлемент; 6 – сборник шлама; 7 – кран отвода шлама; 8 – верхняя крышка; 9 – кран отвода воздуха; в – циклон-фильтр: 1 – входной патрубок, 2 – корпус, 3 – коническое днище, 4 – штуцер отвода, 5 – цилиндрический каркас, 6 – плотный фильтровальный материал, 7 – тонкая фильтровальная ткань, 8 – продувочные штуцеры, 9 – цапфовый элемент, 10 – верхний торец, 11 – крепежные элементы разъема

Циклон-фильтр по [5] (рис. 1в) может быть использован при необходимости тонкой очистки и обеззараживания вентиляционного воздуха, подаваемого, например, в операционные отделения учреждений здравоохранения, а также для очистки производственных выбросов, в том числе загрязненных особо опасными взвесями. Техническая задача интенсификации циклонной обработки и повышения степени осаждения тонкодисперсных частиц решается здесь путем увеличения скорости дисперсного потока с одновременным принятием мер по предотвращению абразивного износа внутренних поверхностей аппарата. Устройство позволяет уменьшить ресурсоемкость, однако энергозатраты растут пропорционально увеличению скорости. Существует еще ряд конструкций фильтров-циклонов, например, разработанная авторами, конструкция со сквозной центральной трубой в оси циклона, [6], с целью снижения перепада статического давления без ухудшения степени очистки. По представлениям авторов [7], в классических стандартных циклонах без центральной направляющей трубы переход от ламинарного к турбулентному течению происходит внутри выхлопной трубы аппарата. В результате ядро вихря потока в аппарате становится нестабильным, что вызывает большие потери давления и энергозатраты. В свою очередь,



это вызывает, по [8], высокие потери (до 90 % от общей потери давления) вследствие диссипации энергии в потоке. Однако данные, приводимые авторами конструкции с центральной направляющей трубой, показывают, что опыты проводились при нагрузках в 1,5...2 раза ниже оптимальных для классических стандартных циклонов такого типа. В целом анализ отечественных и зарубежных источников последних десятилетий показал отсутствие конструкций, которые обеспечивали бы высокую (более 98 %) степень очистки взвеси класса РМ<sub>2,5</sub> без резкого увеличения энергозатрат на обработку выбросов.

Для достижения данного результата выполнены стендовые испытания циклона-фильтра, конструкция которого была разработана авторами на базе серийного циклона ЦН-11 диаметром 200 мм. Испытания проводились на специально приготовленном дисперсном материале – шамотной пыли с размером частиц до 63 мкм. Пробу материала для испытаний отбирали в соответствии с надлежащей лабораторной практикой по ГОСТ Р 51568-99 (ИСО 3310-1-90). Пробу получали посредством следующих стандартных операций, производимых ручным способом: тонкого дробления предварительно измельченного шамотного материала, просеивания частиц через сито с размером ячеек 0,063 мм, истирания частиц размером 0,063 мм и менее, сокращения (квартования) полученной пыли. Отобранная проба подвергалась дисперсионному анализу методом седиментации в дистиллированной воде для определения характеристик пыли (медианного диаметра частиц и дисперсии). Изменение массы, оседающего в дисперсионной жидкости, измельченного материала регистрировалось на торсионных весах ВТ-500.

Для седиментационного анализа брали из просеянной пробы количество материала, достаточное для приготовления суспензии с объемной долей взвеси до 0,5... 1 %. В дальнейшем по результатам опытных замеров на основании закона Стокса получали размеры частиц:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta H}{2(\rho_p - \rho_L)g\tau}}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота оседания частиц,  $\tau$  – время оседания,  $n=H/\tau$  – скорость оседания,  $r$  – радиус частиц,  $\rho_p$  – плотность частиц,  $\rho_L$ ,  $\eta$  – плотность и вязкость дисперсионной среды.

Радиус частиц по результатам седиментационного анализа (табл. 1) по фракциям получились от 1,23 мкм до 31,51 мкм; следовательно, наибольший диаметр частиц пыли по результатам седиментационного анализа равен 63 мкм.

Таблица 1

#### Результаты седиментационного анализа

№ фракции	Время осаждения, с		Радиус фракции, мкм		$\Delta r$ , мкм	$P_i$ , %	$\Delta m/\Delta r$ , 10 <sup>5</sup> мг/м	$\Delta P$ , %
	$\tau_{\min}$	$\tau_{\max}$	$r_{\min}$	$r_{\max}$				
1	10	30	31,51	18,19	13,32	34,78	9,01	17,39
2	30	60	18,19	12,86	5,33	52,17	11,26	8,70
3	60	120	12,86	9,09	3,77	60,87	15,93	8,70
4	120	240	9,09	6,43	2,66	69,57	22,52	8,70
5	240	360	6,43	5,25	1,18	78,26	42,37	7,25
6	360	600	5,25	4,07	1,18	85,51	42,37	4,35
7	600	1200	4,07	2,88	1,19	89,86	25,18	4,35
8	1200	2400	2,88	2,03	0,84	94,20	25,18	2,90
9	2400	6600	2,03	1,23	0,81	97,10	24,77	2,90

Схема экспериментального стенда для испытания циклона-фильтра приведена на рис. 2. Запыленный воздух протягивается через циклон – 7 вентилятором – 14. Шамотная пыль в порошкообразном состоянии через измерительный коллектор – 1 подается из пылепитателя в воздуховод – 2 диаметром 140 мм. Входная скорость в циклон замерялась до запыления термоанемометром – 19 (модель Testo 425), установленным в круглый порт доступа – 4. Запыленный поток проходит по воздуховоду во входной патрубок – 6 циклона – 7 и попадает в кольцевое пространство внутри него между корпусом и выхлопной трубой – 8. При таком движении потока ряд частиц вследствие инерционности сходит с криволинейных линий тока, соударяется со стенкой циклона – 7

и сползает в бункер – 17 с герметичным затвором – 16. Наиболее мелкие фракции пыли задерживаются тканевым фильтром – 13, где происходит осаждение пыли среднего и мелкого размера по касательному и инерционному механизмам. Далее поток совершает движение вниз по винтовой траектории, разворачивается перед бункером вверх и выходит по восходящей винтовой траектории через выхлопную трубу – 8.

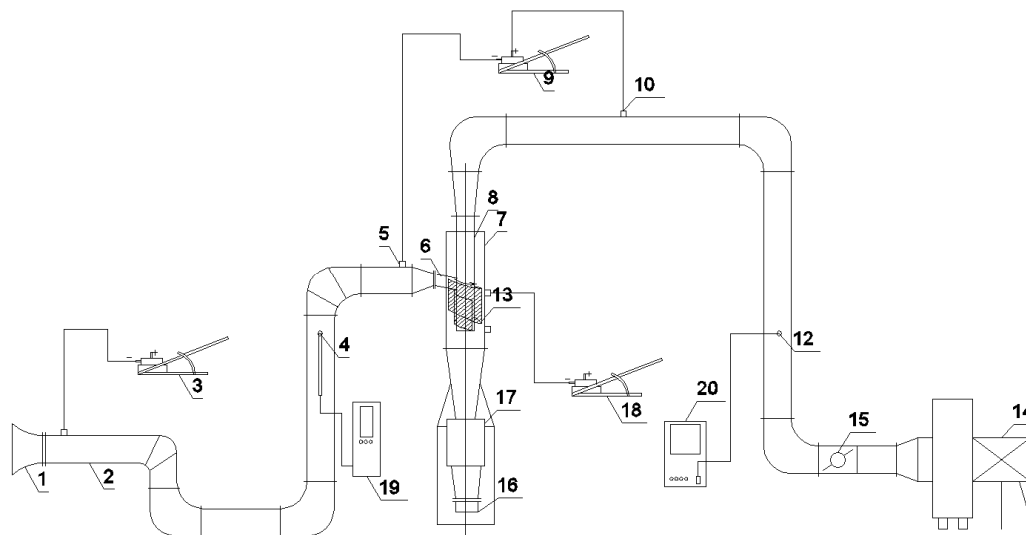


Рис. 2. Экспериментальный стенд для испытания серийного циклона ЦН-11

Расход воздуха на входе в циклон замерялся при помощи коллектора – 1 с внутренним диаметром 140 мм и микроманометра – 3. Регулировка расходов воздуха в сети выполнялась дроссель-клапаном – 15 на пяти режимах. Для нахождения сопротивления циклона замеряли перепад давления  $\Delta P$  микроманометром – 9 в точках 5 и 10.

В порт доступа круглого сечения 12 устанавливали импактор 20 для определения дисперсного состава пыли после циклона-фильтра.

Запыленный поток, поступая в центральное сопло первого диска, приобретает определенную скорость и после выхода из сопла изменяет свое направление на  $90^\circ$ , чтобы попасть в периферийные сопла второго диска. При этом наиболее крупные частички пыли под действием инерционных сил попадают на поверхность смазки в выемке второго диска и оседают на ней. Более мелкие и, соответственно, менее инерционные частицы, уносятся с потоком газов и проходят через сопла второго диска. Суммарное сечение этих сопел равно сечению сопла первого диска. Поэтому скорость газового потока на выходе из сопел второго диска будет такой же, и в выемке третьего диска осадут частицы пыли того же размера, которые не осели на смазке в выемке второго диска. Следующее сопло, через которое проходит газовый поток, имеет меньший диаметр, т.е. скорость истечения будет несколько больше, и на подложке в соответствующей выемке осадут частицы меньшего размера, чем на предшествующих двух дисках. Таким образом, на каждой паре последовательно установленных дисков будет осажаться определенная фракция пыли. Размер фракций пыли, осаждающейся в каждой ступени импактора, образуемой соответствующей парой дисков, определяется предварительной тарировкой и указан в паспорте импактора по ТИ 34-70-037-83.

Результаты анализа дисперсного состава потока приведены в табл. 2, по которому можно сделать вывод, что среднегеометрический размер частиц  $d_{50} = 1,6$  мкм.

Таблица 2

#### Фракционный состав пыли

Размер фракции, мкм	> 0,4	> 0,8	> 1,6	> 3,5	> 6,0	> 10
Массовая доля фракции, %	80	70	50,0	30	10	5

По суммарному привесу шайб и фильтра импактора можно определить запыленность газового потока по формуле:

$$Z_r = \frac{\sum g'}{Q \cdot T \cdot 10^{-3}}, \quad (2)$$

где  $Z_r$  – запыленность газов, мг/м<sup>3</sup> (при нормальных условиях);  $\sum g^i$  – суммарный привес шайб и фильтра импактора, мг.

$$Z_r = \frac{26}{0,249 \cdot 10^{-3} \cdot 260} = 401,61 \text{ мг/м}^3.$$

Образцы фильтровального материала взвешивались в начале и конце испытания. После окончания испытания с начальной, средней и конечной частей фильтровальной ткани вырезались образцы для сравнительного определения эффективности осаждения по счетной концентрации уловленных частиц, которая устанавливалась в результате изучения образцов под микроскопом МИН-8 с 400-кратным увеличением. Образец тканевого фильтра представлен на рис. 4. На нем отчетливо видны осевшие крупинки пыли размером до 1 мкм. Это позволило провести определение счетного количества частиц классов PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, что необходимо для достоверного сопоставления интенсивности их оседания из потока на фильтр при различных режимах.

Для регистрации изображения с помощью оптического микроскопа необходимо дальнейшее увеличение построенного им изображения при не слишком высоком увеличении объектива. Для этого есть три возможности. Первая состоит в использовании окуляра и дополнительных линз, помещаемых между объективом и окуляром. Вторая – в фокусировке изображения на светочувствительную фотопленку и его последующем фотоувеличении. Третий способ – это сканирование изображения и демонстрация его на мониторе. В последние годы достигнут значительный прогресс в развитии высококачественных ПЗС-матриц (сокр. от «прибор с зарядовой связью»), называемых в оптике так же ССD-камерами (сокр. от англ. «Charge-Coupled Device»), позволяющих создавать цифровое изображение. При этом отпадает необходимость в дополнительных линзах. В настоящее время этот способ записи изображения продолжает интенсивно развиваться [9].

В данной работе лабораторный микроскоп МИН-8 был использован совместно с дополнительным освещением для изучения непрозрачных объектов в отраженном свете. На наклонную насадку микроскопа устанавливалась цифровая камера фотоаппарата (разрешение камеры 12 мегапикселей; объектив с диафрагмой F/1,8 поглощает на 50 % больше света для увеличения контрастности и улучшения качества снимков в условиях плохой освещенности), после чего добивались фокусировки микроскопом. Для создания четкого изображения запыленной поверхности фильтра была организована дополнительная подсветка к обычному освещению предметного столика (лампой накаливания справа и сверху), а также к общему освещению комнаты люминесцентными лампами и солнечным светом из окна.

При микроскопии осажденных на поверхности фильтра частиц шамота (рис. 3), отличающихся от окружающей среды только по показателю преломления, изменения интенсивности света (амплитуды) не происходит, а изменяется только фаза световых волн, и наблюдаемые объекты выглядят мало контрастными, что и позволило провести определение счетного количества осажденных частиц шамота на поверхности фильтра.

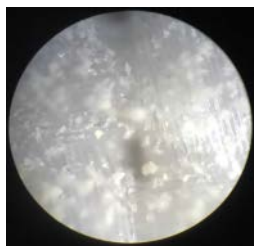


Рис. 3. Запыление поверхности фильтрующей вставки по результатам эксперимента при полном открытии дроссель-клапана

Таким образом, проведенные опытные исследования показали целесообразность конструктивного дополнения возвратно-поточных циклонов фильтрующей вставкой в зоне, где происходит инерционное осаждение пыли. Вместе с тем, с целью доработки конструкции ряд исследований выполнен на базе расчетных методов. Для определения эффективности отделения взвешенной части потока в данном циклоне-фильтре был использован безразмерный комплекс  $Re_r$ , полученный из дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы и вращающегося потока [10]:

$$Re_r = \frac{U_0 \cdot \rho_p^2 \cdot D_p^4}{c \cdot \rho_g \cdot R_2^3 \cdot \eta}, \tag{3}$$

где  $U_0$  – начальная скорость, м/с,  $\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>,  $D_p$  – диаметр микрочастиц, м,  $c$  – коэффициент, зависящий от завихряющегося устройства,  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>,  $R_2$  – радиус циклона, м,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Численное значение  $Re_r$  по (3) в окончательном виде – это энергетическая характеристика эффективности выделения взвешенной частицы с определенными инерционными параметрами из потока, создаваемого циклоном с данными конструктивными характеристиками. Это позволяет определять по значениям  $Re_r$  фракционную степень инерционной сепарации частиц из потока при существующих энергозатратах [10].

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  на основе ЦН-11-200 в соответствии с рабочими условиями для размеров частиц  $D_p = (1...100) \times 10^{-6}$  м при относительной скорости потока на входе в циклон  $U_0 = 1,0...14,0$  м/с представлены на рис. 4 и в табл. 3.

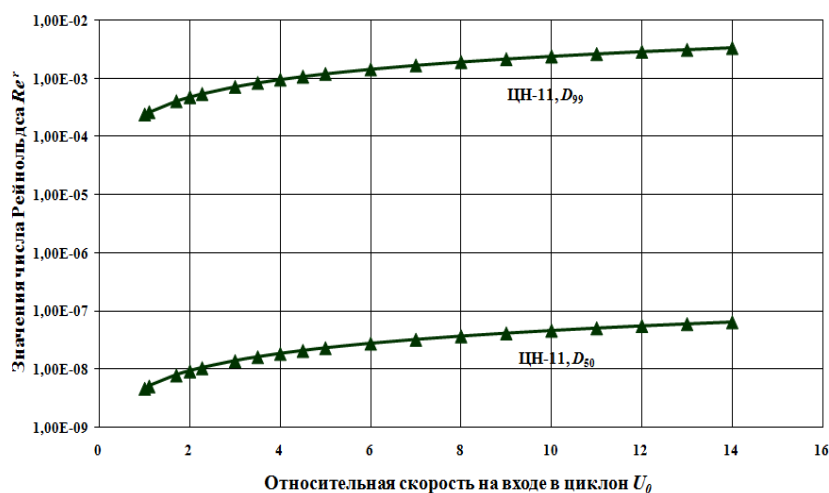


Рис. 4. Зависимость относительного числа Рейнольдса  $Re_r$  для циклона с радиусом  $R=0,1$  м от относительной скорости потока на входе в циклон  $U_0$ , м/с

Таблица 3

**Зависимость числа  $Re_r$  от скорости потока на входе в циклон для частиц, оседающих на 50 % и 99 % в кольцевом сечении модели циклона ЦН-11-200 диаметром 200 мм**

Степень сепарации частиц *, %	Критические числа $Re_r$ , при скорости потока на входе в циклон $U_0$ , м/с				
	1,0	5,0	7,0	10,0	14,0
50	$4,67 \cdot 10^{-9}$	$2,33 \cdot 10^{-8}$	$3,27 \cdot 10^{-8}$	$4,67 \cdot 10^{-8}$	$6,54 \cdot 10^{-8}$
99	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-3}$

\* Размеры частиц, оседаемых в циклоне ЦН-11-200 на 50 % ( $D_{50}$ , по паспортным данным) и на 99 % ( $D_{99}$ ), равны соответственно  $3,65 \cdot 10^{-6}$  м и  $55,0 \cdot 10^{-6}$  м.

Расчеты показали, что степеням осаждения частиц в циклоне соответствуют строго определенные значения чисел  $Re_r$ . Так, степени осаждения 99 % при скорости 5,0 м/с может быть сопоставлено число  $Re_r = 1,2 \cdot 10^{-3}$ , а степени осаждения 50 %  $Re_r = 2,33 \cdot 10^{-8}$ .

Проведенные исследования показывают, что параметр  $Re_c$  позволяет находить численные значения параметров очистки в сепараторах с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Расчеты на основе  $Re_c$  приводят к результатам, близким к опытным. Поэтому значение числа  $Re_c$  для них может рассматриваться как критериальный параметр.

Также было выполнено численное моделирование аэродинамических параметров работы циклона-фильтра на основе методов вычислительной гидродинамики. При этом виртуальное запыление в численном эксперименте не проводилось, поскольку эффективность осаждения точнее и легче определяется через критериальный параметр осаждения  $Re_c$ . Необходимость численного исследования в том, что проведение подобного натурального эксперимента с непосредственным наблюдением всех характеристик потока, которые возможно идентифицировать в численной 3d-модели, чрезвычайно затруднительно. И поскольку (как было показано на натурном эксперименте) наличие фильтрующей вставки не нарушает интенсивности крутки, то вопросы, связанные с характеристиками потока (распределения скорости и давлений) в пределах кольцевого пространства, можно исследовать численно без моделирования фильтрующей вставки.

На рис. 5 представлены эпюры скорости и давления в продольном сечении модели при скорости 5,0 м/с и показаны расположения поперечных сечений.

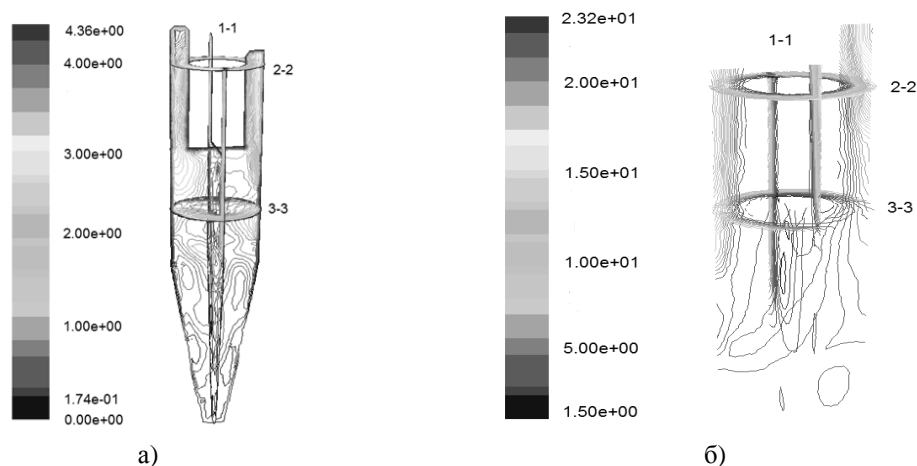


Рис. 5. Распределение скорости потока (а) и давления (б), в пределах кольцевой зоны в продольном сечении циклона 1-1, 2-2 – поперечное сечение на входе циклона; 3-3 – поперечное сечение на выходе потока из кольцевой зоны циклона

Энергетические параметры вращающегося потока соизмеримы с величиной его энергии на входе в аппарат. В таких условиях для описания процесса сепарации целесообразно использовать систему из осредненного уравнения Навье-Стокса для движения однофазного потока и уравнения движения частиц, основанного на законе Ньютона. Для обеспечения замкнутости системы в уравнениях переноса и потери (диссипации) кинетической энергии использована модель вязкости Спаларта-Аллмараса [11, 12]. После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона.

Как было отмечено выше, полезные величины энергетических затрат должны быть непосредственно связаны с улавливанием взвешенных частиц. В данной конструкции это процессы осаждения на поверхностях фильтровальной вставки и внутренней стенки циклона. Потери энергии на сопротивления, возникающие при тангенциальном входе в циклон запыленного потока и при его движении в соединительных фасонных деталях до циклона, таковыми не являются, но они неизбежны в процессе эксплуатации аппарата.

Для дальнейшего совершенствования в этом отношении циклона-фильтра могут использоваться рекомендации по снижению сопротивления в канале с боковым отверстием [13], полученные на основе компьютерного моделирования течений методами вычислительной гидродинамики.

Предлагаемая конструкция циклона-фильтра позволяет достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50 % (диаметра отсекаания), со средних для циклонов значений 5-10 мкм до 0,5 мкм. Указанное улучшение качества очистки не требует существенного увеличения затраты энергии. Это является одним из преимуществ перед обычными циклонами, у которых для снижения диаметра отсекаания на 0,1 мкм (начиная с 2-3 мкм) требуется увеличивать затраты энергии до 15 %.

### Список библиографических ссылок

1. Октябрьский М. Л. Оборудование для очистки воздушной среды рабочей зоны // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 16. С. 14–18.
2. Зиганшин М. Г., Колесник А. А., Зиганшин А. М. Проектирование аппаратов пылегазоочистки: учебное пособие. СПб. : Лань, 2014. 544 с.
3. Техническая информация по пылеулавливающим агрегатам серии ПУМА. 2017. URL: <http://www.st-vent.ru/index.php/filter-pyleulovitel/filter-abraziv/filter-puma> (дата обращения: 27.10.2017).
4. Валиулин С. С., Курников А. С. Моделирование гидродинамических процессов в циклонной части фильтра-сепаратора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2011. № 3. С. 72–77.
5. Циклон-фильтр : пат. 2361678 Рос. Федерация. № 2008110843/15; заявл. 14.03.2008 ; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. 5 с.
6. Staudinger G. Zyklone mit zentralkörpern // Veröffentlichung in Chem. Ing. Tech. 1992. № 64. P. 769–888.
7. Bielefeldt E. A. Wirbelkammern neuerer technologie. Bericht : Neue Patentanmeldung Wirbeltrennverfahren, 2013. 286 p.
8. Muschelknautz E. Theorie der fliehkraftabscheider mit besonderer berücksichtigung hoher temperaturen und drücke // VDI-Bericht Nr. 1980. № 363. P. 49–60.
9. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М. : Техносфера, 2006. 384 с.
10. Зиганшин М. Г., Зиганшин А. М. Лабораторно-практический курс пылегазоочистки. Часть 1. Казань : КГАСУ, 2012. 188 с.
11. Зиганшин М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 1. Оценки эффективности, теоретические основы и критерии оценки. Казань : КГЭУ, 2013. 252 с.
12. Зиганшин М. Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Казань : КГЭУ, 2013. 212 с.
13. Зиганшин А. М., Гимадиева Г. А., Батрова К. Э. Численное исследование истечения из бокового последнего и среднего отверстий: сб. статей I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера / НГАСУ. Новосибирск, 2017. С. 103–111.

**Zamaliyeva A.T.** – engineer

E-mail: [Albina-0587@rambler.ru](mailto:Albina-0587@rambler.ru)

**LTD Gazprom transgaz Kazan**

The organization Address: 420000, Russia, Kazan, A. Kutuya st., 41

**Ziganshin M.G.** – doctor of technical sciences, associate professor

E-mail: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru)

**Potapova L.I.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [ludmilapo@mail.ru](mailto:ludmilapo@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization Address: 420043, Russia, Kazan, Zelyonaya st., 1

## The analysis of efficiency of use of a cyclonic filtration for sedimentation of fine particles

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of work is the improvement of the cyclonic and filtering dust collectors by means of increase in efficiency of sedimentation of fine particles of the classes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> with simultaneous decrease in power and material inputs.

*Results.* The analysis of the existing ways of cyclonic filtration of production disperse emissions is carried out. Experiments on the serial TsN-11-200 cyclone in vitro are executed, aerodynamic characteristics of his work on various modes of cleaning are found. The numerical experiment on the basis of methods of computing hydrodynamics is made.

*Conclusions.* The received results specify that addition in the form of the filtering insert leads to increase in efficiency of purification of gas, at the same time doesn't demand additional expense of energy.

**Keywords:** cyclone, filter, separation, extent of cleaning, numerical modeling.

### References

1. Octabr'skiy M. L. Equipment for cleaning of the air environment of a working zone // Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa. 2016. № 16. P. 14–18.
2. Ziganshin M. G., Kolesnik A. A., Ziganshin A. M. Design of devices of a dusting: manual. SPb.: Lan', 2014. 544 p.
3. Technical information on dust removal units of the PUMA series. 2017. URL: <http://www.st-vent.ru/index.php/filter-pyleulovitel/filter-abraziv/filter-puma> (reference date: 27.10.2017).
4. Valiulin S. S., Kournikov A. C. Modeling of hydrodynamic processes in a cyclonic part of the filter separator // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. № 3. P. 72–77.
5. Cyclone filter: patent 2361678 of the Rus. Federation. №. 2008110843/15 ; decl. 3.14.2008 ; publ. 7.20.2009, Bull. № 20. 5 p.
6. Staudinger G. Zyklone mit zentralkörpern // Veröffentlichung in Chem. Ing. Tech. 1992. № 64. P. 769–888.
7. Bielefeldt E. A. Wirbelkammern neuerer technologie. Bericht : Neue Patentanmeldung Wirbeltrennverfahren, 2013. 286 p.
8. Muschelknautz E. Theorie der fliehkraftabscheider mit besonderer berücksichtigung hoher temperaturen und drücke // VDI-Bericht Nr. 1980. № 363. P. 49–60.
9. Brandon D., Kaplan U. Mikrostruktura of materials. Methods of a research and M.'s control : Technosphere, 2006. 384 p.
10. Ziganshin M. G., Ziganshin A. M. Laboratory course of a dusting. Part 1. Kazan : KGASU, 2012. 188 p.
11. Ziganshin M. G. Systems of cleaning of emissions of thermal power plant. Part 1. Kazan : KGEU, 2013. 252 p.
12. Ziganshin M. G. Systems of cleaning of emissions of thermal power plant. Part 2. Kazan : KGEU, 2013. 212 p.
13. Ziganshin A. M., Gimadiyeva G. A., Batrova K. E. A numerical research of the expiration from side last and average openings: dig. of art. I of the All-Russian scientific and technical conference devoted to memory of the Dr. Sci. Tech., professor, A.A. Sandera / NGASU. Novosibirsk, 2017. P. 103–111.

УДК 625.7/.805:504.5

**Лупанов А.П.** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор

E-mail: [abz4@abz4.ru](mailto:abz4@abz4.ru)

«АБЗ-4 «Капотня»

Адрес организации: 109429, Россия, г. Москва, ул. Верхние поля, д. 54

**Силкин В.В.** – кандидат технических наук, профессор

E-mail: [alesilkin@yandex.ru](mailto:alesilkin@yandex.ru)

**Баяртогтох Дулмаа** – студент

E-mail: [dulmashka417@gmail.com](mailto:dulmashka417@gmail.com)

**Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет**

Адрес организации: 125319, Россия, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 64

**Ильина О.Н.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ilina@kgasu.ru](mailto:ilina@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Обеспечение экологической безопасности при производстве асфальтобетонных смесей на асфальтобетонном заводе (АБЗ)**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы являлось определение основных направлений обеспечения экологической безопасности и выполнение требований экологического законодательства при производстве асфальтобетонных смесей на АБЗ.

*Результаты.* Основные результаты работы состоят в определении выбросов вредных веществ на АБЗ при использовании различных видов топлива, также определены основные направления и разработаны рекомендации по обеспечению экологической безопасности при производстве асфальтобетонных смесей на АБЗ.

*Выводы.* Реализация рекомендаций в отношении обеспечения экологической безопасности при производстве асфальтобетонных смесей позволит снизить количество вредных выбросов при эксплуатации АБЗ. Это будет способствовать экологически безопасному производству асфальтобетонных смесей, что в итоге повысит безопасность эксплуатации АБЗ в регионах Российской Федерации.

**Ключевые слова:** АБЗ (асфальтобетонный завод), асфальтобетонные смеси, вредные выбросы, вспененный битум, мазут, природный газ, теплые асфальтобетонные смеси, тканевый фильтр, экологические требования.

Указом президента РФ от 19.04.2017 г. № 176 утверждена новая Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Стратегией определены основные приоритетные направления в области обеспечения экологической безопасности РФ, в число которых обращено внимание на внедрение инновационных экологических технологий, развитию экологически безопасных производств.

При приготовлении асфальтобетонных смесей на заводах образуются и выделяются загрязняющие вещества в окружающую среду. Указ Президента Российской Федерации, принятые в последнее время федеральные законы, постановления Правительства Российской Федерации, приказы Минприроды России по вопросам экологического развития страны предопределяют осуществление на предприятиях, в частности, на асфальтобетонных заводах (АБЗ), необходимых мероприятий, направленных на снижение их вредного воздействия на природную среду. При этом в целях защиты населения чрезвычайно важно выполнение требований Постановления Главного государственного санитарного врача РФ от 25.04.2014, в соответствии с которым АБЗ должен быть отделен от жилой застройки санитарно-защитной зоной, размер которой для АБЗ составляет не менее 500 м.

Особое значение по количеству и качеству вредных выбросов имеет вид применяемого топлива для нагрева каменных материалов при производстве горячих асфальтобетонных смесей. В основном в России применяют в качестве топлива мазут и



другое жидкое топливо. Попытки добавления в мазут различных катализаторов с целью уменьшения вредных выбросов на АБЗ не обеспечивают решение этой важной проблемы. Поэтому переход на альтернативные виды топлива приобретает большую актуальность. Для уменьшения вредных выбросов на АБЗ осуществляется замена жидкого топлива на газообразное. Обследование АБЗ, работающих на газе, выявило низкий уровень загрязнения атмосферы всеми видами окислов и углеродов, а также снижение капитальных затрат асфальтобетонного завода. В табл. 1-2 приведены данные на «АБЗ № 4 «Капотня» (Москва) по выбросам и размерам платы в пересчете на 1 т асфальтобетонной смеси для асфальтосмесительных установок компаний «Amomatic» и «Ammann» при применении природного газа и мазута. Размер платы рассчитан как для выбросов в пределах установленных ПДВ, так и для сверхустановленных значений ПДВ. В последнем случае размеры платы увеличиваются в 25 раз. Из приведённых данных следует, что применение природного газа позволяет уменьшить выбросы по некоторым загрязняющим веществам в 5-6 раз по сравнению с использованием мазута. Кроме того при работе на мазуте дополнительно образуются вредные вещества, которые практически не образуются при использовании природного газа. Это мазутная зола, дигидросульфат и диоксид серы. Указанные выбросы наиболее токсичны, нормативы платы по ним самые высокие.

Таблица 1

**Выбросы веществ и размеры платы при применении природного газа**

№ п/п	Наименование веществ	Количество выбросов на 1 тонну смеси, т.	Плата за загрязнение на 1 т смеси, руб.	Плата при сверх нормативных выбросах на 1 т смеси, руб.
1	Диоксид азота	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$18,7 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$
2	Оксид азота	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
3	Оксид углерода	$58,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
4	Углероды предельные (C12-C19)	$5,7 \cdot 10^{-6}$	-	-
5	Пыль неорганическая	$54,3 \cdot 10^{-6}$	$46,5 \cdot 10^{-4}$	$11,7 \cdot 10^{-2}$
6	Карбонат кальция	$0,02 \cdot 10^{-6}$	-	-
7	Углерод (сажа)	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
8	Диоксид серы	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Всего:		$127,92 \cdot 10^{-6}$	$0,007 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

**Выбросы веществ и размеры платы при применении мазута**

№ п/п	Наименование веществ	Количество выбросов на 1 т смеси, т	Плата за загрязнение на 1 т смеси, руб.	Плата при сверх нормативных выбросах на 1 т смеси, руб.
1	Диоксид азота	$35,2 \cdot 10^{-6}$	$91,9 \cdot 10^{-4}$	0,23
2	Оксид азота	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$10,0 \cdot 10^{-4}$	0,03
3	Оксид углерода	$179,0 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,01
4	Углероды предельные (C12-C19)	$137,1 \cdot 10^{-6}$	-	-
5	Пыль неорганическая	$72,6 \cdot 10^{-6}$	$62,2 \cdot 10^{-4}$	0,16
6	Диоксид серы	$278,3 \cdot 10^{-6}$	$238,5 \cdot 10^{-4}$	0,60
7	Мазутная зола	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$132,0 \cdot 10^{-4}$	0,33
8	Дигидросульфид (сероводород)	$0,04 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,02
Всего:		$708,4 \cdot 10^{-6}$	$0,054 \cdot 10^{-4}$	1,36

В перспективе следует рассмотреть в качестве альтернативных видов топлива применение на АБЗ сжиженных углеводородных газов (СУГ), опыт использования которых как за рубежом так и в РФ при газификации населённых пунктов, предприятий коммунального сектора, промышленных предприятий показал ряд преимуществ, в сравнении с традиционной газификацией. Экспертная оценка специалистов показала, что в ближайшем будущем в России возможен рост производства СУГ на 5-7 млн. тонн в год.

В качестве примера системы снабжения сжиженным углеводородным газом промышленных предприятий, в том числе асфальтобетонных заводов, можно привести оборудование компании «Экогаз» (Москва) в составе [1]:

- резервуар с номинальным объемом 20 м<sup>3</sup> для подземного размещения (рис. 1);
- комплектная установка с самовсасывающим носом для подачи пропан-бутана из подземных резервуаров и установкой для паровой фазы.

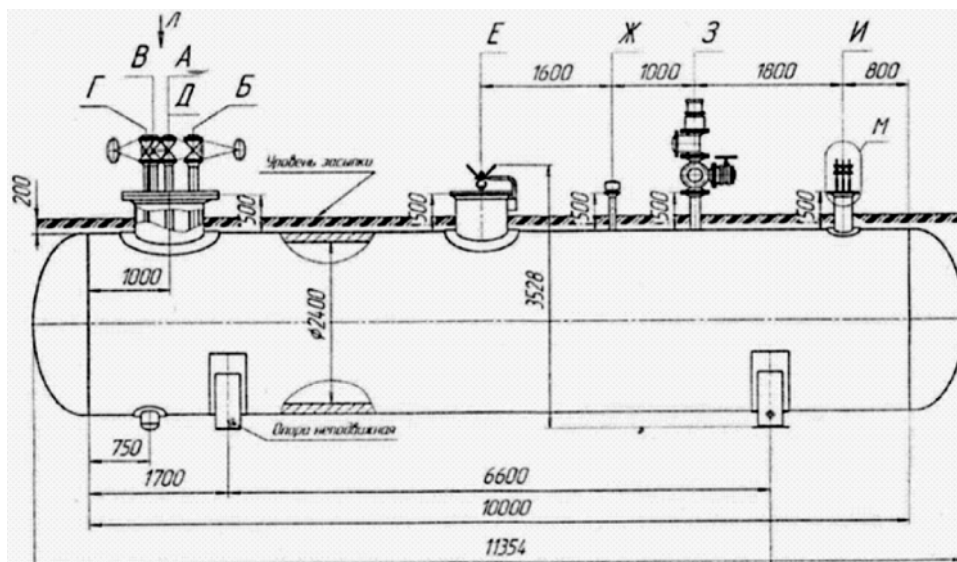


Рис. 1. Резервуар для хранения сжиженного углеводородного газа (СУГ):

- А – штуцер ввода жидкой фазы сжиженного газа; Б – штуцер вывода сжиженного газа;  
 Г – штуцер дренажа; Д – штуцер для манометра; Е – люк-газ;  
 Ж – штуцер индикатора-сигнализатора уровня; З – штуцер для предохранителя клапан;  
 И – штуцер для установки мерных трубок и термометра

В настоящее время на объектах дорожного хозяйства РФ эксплуатируются преимущественно АБЗ на базе асфальтосмесительных установок ПАО «Кредмаш» (Украина), их доля в структуре парка асфальтосмесительного оборудования более 70 %. Значительная часть этих асфальтосмесительных установок морально устаревших конструкций (Д-508-2А, ДС-117-2Е, ДС-158 и др.) по экологическим показателям не соответствуют современным требованиям экологического законодательства РФ. Система очистки газов и уловителей пыли этих асфальтосмесительных установок основана на использовании мокрых пылеуловителей, обладающих рядом недостатков, ограничивающих область их применения: образование в процессе очистки шлама, что требует специальных систем для его переработки; вынос влаги в атмосферу и вероятность забивания газоотходов и оборудования пылью и потери жидкости вследствие брызгоуноса; большой расход воды и необходимость создания оборотных систем подачи воды в пылеуловитель. С ужесточением требований к очистке газов целесообразно более широкое внедрение тканевых фильтров вместо мокрых пылеуловителей.

На зарубежных асфальтосмесительных установках на второй ступени очистки запыленных газов и осаждения мелкой пыли применяют тканевые фильтры. Они имеют высокую эффективность, которая не зависит от изменения количества поступающих газов. Создание тканевых фильтров является основным направлением усовершенствования пылеулавливающих систем асфальтосмесительных установок. Эффективность применяемых рукавных тканевых фильтров зарубежных компаний Amman (Германия), Lintec (Германия), Marini (Италия), Astec (США), Terex (США), Almix (США–Сингапур), Amomatic (Финляндия) и составляет 99,8-99,9 %. В настоящее время имеет место оснащение дорожных организаций России асфальтосмесительными установками ЗАО Номбус (Россия), ИПК «Ротор» (Россия) и ПАО Кредмаш (Украина).

Установки этих компаний могут поставляться и с тканевыми рукавными фильтрами в модификации на природном газе.

Опыт применения тканевых фильтров на современных асфальтосмесительных установках показал, что они обеспечивают: более высокую степень очистки газов от взвешенных частиц, чем газоочистные аппараты других типов; возможность улавливания частиц практически при любом давлении газов; использование химически стойких материалов; возможность полного улавливания пыли всех размеров, включая субмикронные. Однако стоимость тканевых фильтров в составе асфальтосмесительных установок достигает 10-15 % стоимости их технологического оборудования, что является сдерживающим фактором их более широкого применения на АБЗ.

Важным направлением в части обеспечения постоянно возрастающих экологических требований является внедрение экологически более чистых способов производства асфальтобетонных смесей, отличающихся от традиционных горячих технологий гораздо меньшими выбросами вредных веществ в окружающую среду. В целях обеспечения экологических требований на АБЗ в мировой и отечественной практике все больше распространение получает приготовление холодных и теплых асфальтобетонных смесей вместо традиционных горячих. Применение холодных и теплых смесей является перспективным направлением, поскольку позволяет сократить расход энергоресурсов и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Технология приготовления холодных влажных органоминеральных смесей (ВОМС) в установке циклического действия оборудованной системой подачи и дозирования воды приведена на рис. 2. Особенности технологии заключаются в обязательном приготовлении асфальтобетонной смеси в асфальтосмесительных установках принудительного действия при следующей последовательности дозирования и подачи компонентов: щебень, песок, минеральный порошок, вода, битум. Вода может дозироваться установленным дозатором, либо водяным насосом. Битум вводится в асфальтосмеситель после перемешивания минеральных материалов с водой. Время перемешивания (около 30 сек) уточняется опытным путем. При производстве влажных смесей нагрев минеральных материалов не производится, их подача на грохот осуществляется транспортером минуя сушильный барабан. Технология производства и применения является экологически эффективной, так как практически полностью исключается выброс в атмосферу аэрозолей, содержащих минеральную пыль, различные окислы, канцерогенные углеводы.

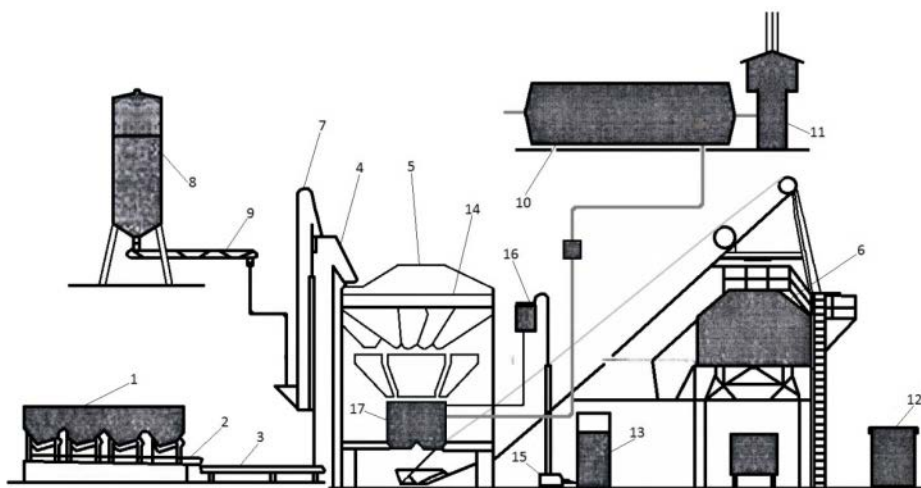


Рис. 2. Технологическая схема приготовления ВОМС:

- 1 – агрегат питания; 2 – сборный транспортер; 3 – горизонтальный транспортер; 4 – элеватор;  
5 – грохот; 6 – бункер готовой смеси; 7 – элеватор минерального порошка;  
8 – агрегат минерального порошка; 9 – шнек; 10 – расходная битумная емкость;  
11 – нагреватель жидкого теплоносителя; 12 – кабина управления;  
13 – расходная емкость для воды; 14 – горячие бункера; 15 – водяной насос;  
16 – дозатор воды; 17 – смеситель

Для обеспечения качественного приготовления холодных асфальтобетонных смесей ведущие компании мира Ammann (Германия), Wirtgen (Германия), SAE (Франция), Kolotticone (Финляндия) и др. предлагают большой выбор мобильных и стационарных специальных асфальтосмесительных установок в широком ассортименте по производительности, уровню автоматизации и комплектности технологического оборудования. С помощью таких асфальтосмесительных установок могут быть изготовлены холодные асфальтобетонные смеси со вспененными битумами, на битумной или эмульсионной основе с новыми материалами и старым асфальтобетоном. На качество холодной смеси в широких пределах можно воздействовать добавлением старого асфальтобетона и цемента.

Анализ традиционной широко применяемой горячей асфальтобетонной смеси показывает, что основным фактором, влияющим на количество и характер выбросов на АБЗ является температура производственного процесса. В настоящее время в США и Европе достаточно широко используются различные технологии производства теплых смесей при более низких температурах (105 – 125 °С) [11, 12, 13]. В США и странах Европы объем применения теплого асфальтобетона постоянно увеличивается и составляет в настоящее время десятки млн. тонн. Количество АБЗ, оборудованных установками для производства теплых смесей составляет уже около 20 % от общего числа асфальтобетонных заводов [5]. В России к настоящему времени широкого внедрения теплых асфальтобетонных смесей не произошло. Вместе с тем на ряде объектов дорожного хозяйства России в Сибири, Республике Татарстан, Самарской области и др. осуществлена укладка теплых асфальтобетонных смесей, которая показала обнадеживающие результаты [7].

На основании исследований, выполненных в России и за рубежом, установлено, что производство теплых асфальтобетонных смесей имеет ряд преимуществ, к числу которых в первую очередь следует отнести:

- снижение потребления топлива на производстве асфальтобетонной смеси;
- уменьшение вредного влияния на окружающую природную среду.

Экономия топлива при реализации технологии производства теплых смесей составляет от 20 до 35 % при значительных сокращениях выхлопов углекислого газа, оксидов азота, диоксида и др. [5, 6].

Опыт производства теплых асфальтобетонных смесей накоплен на АБЗ в Санкт-Петербурге ОАО «Асфальтобетонный завод № 1» и в Москве «АБЗ № 4 «Капотня». Производство теплых смесей осуществляется двумя принципиальными используемыми способами: путем применения различных специальных добавок, либо за счет применения вспененного битума. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено положительное влияние специальных добавок на основные качественные характеристики асфальтобетонных смесей. Показано, что их применение улучшает водостойкость, подвижность, а также прочностные показатели [3]. Однако высокая стоимость добавок преимущественно зарубежного производства (Evotherm, Aspha-min, Sasobit и др.) сдерживает увеличение объема производства теплых смесей для строительства автомобильных дорог. Следует отметить, что использование специальных добавок отечественного производства (ДАД-1 Азол-1017, Адгезол3-ТД и др.) позволит обеспечить экономический эффект от их использования [2, 3]. При применении вспененного битума для приготовления теплых смесей требуется приобретение специального зарубежного оборудования для вспенивания. Выполненными расчетами установлено, что зарубежное оборудование можно окупить при выпуске теплых смесей при работе АБЗ на природном газе – 140 тыс. тонн, при работе на мазуте 120 тыс. тонн, при работе на дизельном топливе 60 тыс. тонн [4].

В соответствии с новыми экологическими требованиями в обязательном порядке на АБЗ также должны быть предусмотрены и выполнены организационно-хозяйственные мероприятия для обеспечения условий и требований, предусматриваемых в требованиях экологических законодательств РФ:

- хранение органических вяжущих в специальных крытых битумохранилищах с надежным отводом вод или в специально обогреваемых цистернах вместо хранилищ ямного типа;

- выгрузка, складирование и внутризаводское транспортирование пылевидных материалов необходимо производить пневматическим транспортом;
- уменьшение пылеобразования на складах каменных материалов их увлажнением;
- обеспечение мер, направленных на полное прекращение сброса в водные объекты недостаточно очищенных сточных вод;
- утилизация всех отходов (применение средств утилизации) или их вывоз в специально установленные места, установленные местными органами исполнительной власти;
- организация действенного производственного экологического контроля в целях выполнения мероприятий по охране окружающей среды, а также в целях соблюдения требований, установленных экологическим законодательством РФ.

### Выводы

1. При строительстве новых АБЗ необходимо в обязательном порядке обеспечить выполнение требований экологического законодательства РФ в части отделения их от жилой застройки санитарно-защитной зоной в размере не менее 500 м. Территория санитарно-защитной зоны должна быть благоустроена газоустойчивыми породами деревьев и кустарников по проекту благоустройства, разработанному одновременно с проектом строительства или реконструкции АБЗ.
2. Отказ от сжигания органического топлива при производстве асфальтобетонной смеси. При невозможности газификации по традиционной технологии следует предусмотреть использование сжиженного углекислого газа.
3. Широкое внедрение экологически чистых технологий производства и укладки теплых и холодных смесей для строительства и ремонта автомобильных дорог – настоятельное требование времени.
4. Необходимо в обязательном порядке провести инвентаризацию отделений комплекса АБЗ с разработкой организационных и технических мероприятий, направленных на снижение выбросов вредных веществ на производственном мероприятии.
5. Обязательным для АБЗ должна стать разработка программ производственного экологического контроля, осуществление его проведения в соответствии с установленными требованиями экологического законодательства РФ.

### Список библиографических ссылок

1. Силкин В. В., Лупанов А. П., Мухин М. А. Перспективы применения сжиженного газа // Строительная техника и технологии. 2013. № 3. С. 64–68.
2. Траутвайн А. И., Ядыкина В. В., Землякова Д. В., Чистяков Ю. Л. Влияние добавок EVOTHERM, АЗОЛ 1007 и АДГЕЗОЛ 3-ТД на свойства битума // Дороги и мосты. 2015. № 33/1. С. 320–333.
3. Гладышев Н. В. Совершенствование технологий приготовления и укладки асфальтобетонных смесей с добавлением гранулята старого асфальтобетона. Автореферат диссертации кандидата технических наук. М. : МАДИ, 2015. 22 с.
4. Лупанов А. П., Силкин В. В., Суханов А. С., Гладышев Н. В. Экономическая эффективность производства асфальтобетонных смесей на вспененном битуме // Автомобильные дороги. 2017. № 9. С. 89–91.
5. Крупин Н. В. Теплый асфальтобетон. Экскурс в развитие технологии // Технический вестник дорожного хозяйства. 2012. № 3. С. 64–74.
6. Радовский Б. С. Технология нового теплового асфальтобетона в США // Дорожная техника. 2008. № 1. С. 56–60.
7. Силкин В. В., Лупанов А. П., Васильев Ю. Э. Приготовление теплых асфальтобетонных смесей // Строительная техника и технологии. 2013. № 5. С. 120–125.
8. Лупанов А. П. Переработка асфальтобетона на АБЗ. М. : Экон-информ, 2012. 210 с.

9. Сагадеев Е. В., Сагадеев В. В. Расчет теплот сгорания предельных углеводородов, входящих в энергетические топлива // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 4. С. 581–585.
10. Сагадеев Е. В., Сагадеев В. В. Расчет теплоты сгорания углеводородных компонентов топлив // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42. № 3. С. 421–425.
11. Austerman A. J., Mogawer W. S., Bonaquist R. Evaluating the Effects of Warm Mix Asphalt Technology Additive Dosages on the Workability and Durability of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement // Transportation research Board of the National Academies. Washington D.C. 2009. P. 9–12.
12. Bennert T., Reinke G., Mogawer W., Mooney K. Assessment of Workability, Compactability of Warm Mix Asphalt // Transportation research Board of the National Academies. Washington D.C. 2010. P. 10–22.
13. Jamshidi A. Effects of Sasobit Content on the Rheological Characteristics of Unaged and Aged Asphalt Binders at High and Intermediate Temperatures / Meor Othman Hamzah, Mohamad Yusri Aman // Materials Research. 2012. № 15 (4). P. 628–638.

**Lupanov A.P.** – doctor of technical sciences, professor, general director

E-mail: [abz4@abz4.ru](mailto:abz4@abz4.ru)

«ABZ-4 «Капотня»

The organization address: 109429, Russia, Moscow, Verhnie polya str., 54

**Silkin V.V.** – candidate of technical sciences, professor

E-mail: [alesilkin@yandex.ru](mailto:alesilkin@yandex.ru)

**Bayartogtokh Dulmaa** – student

E-mail: [dulmashka417@gmail.com](mailto:dulmashka417@gmail.com)

**Moscow State Automobile and Road Technical University**

The organization address: 125319, Russia, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64

**Ilna O.N.** – candidate of technical Sciences, associate Professor

E-mail: [ilina@kgasu.ru](mailto:ilina@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Ensuring the environmental safety during production of asphalt concrete mixtures at the plant**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The aim of this work was to determine the main directions of provision of environmental safety and compliance with the requirements of environmental legislation in the production of asphalt mixes at the asphalt plant.

*Results.* The main results consist in the determination of emissions of harmful substances at the plant using different fuels, are also defined the basic directions and recommendations for environmental safety in the production of asphalt mixes at the asphalt plant.

*Conclusions.* Implementation of recommendations of environmental safety in the production of asphalt mixes will reduce the amount of harmful emissions during operation of asphalt plant. This will contribute to environmentally friendly production of asphalt mixtures, which will ultimately increase the safety of operation of ABZ in the regions of the Russian Federation.

**Keywords:** asphalt plant (asphalt plant), asphalt mix, emissions, foamed bitumen, fuel oil, natural gas, warm mix asphalt, fabric filter, environmental requirements.

#### **References**

1. Silkin V. V., Lupanov A. P., Mukhin M. A. Prospects for the use of liquefied gas // Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii. 2013. № 3. P. 64–68.

2. Trautwein A. I., Yadykina V. V., Zemlyakova D. V., Chistyakov Y. L. Influence of additives EVOTHERM, AZOL 1007 and ADESOL S-TD on the properties of bitumen // *Dorogi i mosty*. 2015. № 33/1. P. 320–333.
3. Gladyshev N. I. Improvement of technologies of preparation and laying of asphalt mixtures with addition of granulated old asphalt concrete // Abstract of thesis of candidate of technical sciences. M. : MADI, 2015. 22 p.
4. Lupanov A. P., Silkin V. V., Sukhanov A. V., Gladyshev N. V. Economic efficiency of production of asphalt mixtures foamed bitumen // *Avtomobil'nyye dorogi*. 2017. № 9. P. 89–91.
5. Krupin N. In. Warm asphalt. Review of the development of technology // *Tekhnicheskiy vestnik dorozhnogo khozyaystva*. 2012. № 3. P. 64–74.
6. Radovsky B. S. Technology new heat asphalt in USA // *Dorozhnaya tekhnika*. 2008. № 1. P. 56–60.
7. Silkin V. V., Lupanov A. P., Vasiliev J. E. Preparation of warm asphalt mixtures // *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*. 2013. № 5. P. 120–125.
8. Lupanov A. P. Recycling of asphalt concrete at the plant. M. : Econ-inform, 2012. 210 p.
9. Sagadeev E. V., Sagadeev V. V. Calculation of the heats of combustion of saturated hydrocarbons included in fuel energy // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2002. T. 40. № 4. P. 581–585.
10. Sagadeev E. V., Sagadeev V. V. Calculation of the heat of combustion of hydrocarbon components of fuels // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2004. T. 42. № 3. P. 421–425.
11. Austerman A. J., Mogawer W. S., Bonaquist R. Evaluating the Effects of Warm Mix Asphalt Technology Additive Dosages on the Workability and Durability of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement // Transportation research Board of the National Academies. Washington D.C. 2009. P. 9–12.
12. Bennert T., Reinke G., Mogawer W., Mooney K. Assessment of Workability, Compactability of Warm Mix Asphalt // Transportation research Board of the National Academies. Washington D.C. 2010. P. 10–22.
13. Jamshidi A. Effects of Sasobit Content on the Rheological Characteristics of Unaged and Aged Asphalt Binders at High and Intermediate Temperatures / Meor Othman Hamzah, Mohamad Yusri Aman // *Materials Research*. 2012. № 15 (4). P. 628–638.

---

---

**ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ  
ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ  
«ИЗВЕСТИЯ КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

Статья должна быть набрана в программе Microsoft Word (версия не ранее MS Word 97). Файл, названный именем автора статьи, представить с расширением RTF.

**Параметры страницы:**

- размер страницы – 297×210 мм (формат А4);
- поля: сверху – 20 мм, снизу – 20 мм, слева – 30 мм, справа – 30 мм;
- ориентация страницы – книжная.

**Параметры форматирования текста:**

- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 11 пт;
- абзацный отступ – 10 мм (не задавать пробелами);
- выравнивание – по ширине;
- заголовки полужирным шрифтом, с выравниванием по центру;
- междустрочный интервал – одинарный.

При наборе статьи исключить автоматический перенос слов. Запрещено уплотнение интервалов шрифта.

Объем публикации – не менее 5 полных страниц и не более 10 страниц, включая таблицы и иллюстрации. Иллюстративный материал не должен перегружать статью (не более 4 рис.). Таблицы и иллюстрации скомпоновать с учетом вышеуказанных полей.

Таблицы создать средствами Microsoft Word и присвоить им имена: Таблица 1, Таблица 2 и т.д. Название таблицы с порядковым номером (или номер таблицы без названия) располагается над таблицей. Текст таблицы должен быть набран шрифтом размером 10 пт с одинарным межстрочным интервалом.

Иллюстрации представить в основных графических форматах (tif, jpg, bmp, gif) с именами Рис. 1, Рис. 2 и т.д. Все объекты должны быть черно-белыми (градации серого), четкого качества. Выравнивание – по центру. Рекомендуемое разрешение – 300 dpi. Названия иллюстраций и подписи к ним набираются шрифтом размером 10 пт с одинарным межстрочным интервалом. **Не допускается** выполнение рисунков в редакторе Microsoft Word. Минимальный размер иллюстраций – 80×80 мм, максимальный – 170×240 мм.

**Все формулы и символы набирать только в Microsoft Word.** Для набора тех формул, которые невозможно набрать в Word, использовать встроенный в Microsoft Word редактор формул Microsoft Equation или Math Type. Формулы в статье, подтверждающие физическую суть исследования (процесса), представляются без развернутых математических преобразований. Формулы компонуются с учетом вышеуказанных полей (при необходимости использовать перенос формулы на следующую строку), помещаются по центру строки, в конце которой в круглых скобках ставится порядковый номер формулы (формулы и их порядковые номера – в таблицах с невидимыми границами). Ссылку на номер формулы в тексте также следует брать в круглые скобки. Следует применять физические величины, соответствующие стандарту СТ СЭВ 1052-78 (СН 528-80).

Иллюстрации, формулы, таблицы и ссылки на цитированные источники, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте. При этом, ссылка на литературные источники берётся в квадратные скобки.

Уникальность текста статьи должна составлять не менее 75 %.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ**

УДК 691.33

**Иванов И.И.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ivanov@kgasu.ru](mailto:ivanov@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

разделительный интервал

**Современные строительные материалы**

разделительный интервал

**Аннотация**

**Текст аннотации** (15-20 строк)

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, карбамидные пенопласты, модификация.

разделительный интервал

**Текст статьи**

разделительный интервал

**Список библиографических ссылок**

разделительный интервал

**Ivanov I.I.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [ivanov@kgasu.ru](mailto:ivanov@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

разделительный интервал



---

---

## Modern building material

разделительный интервал

### Abstract

Текст abstract (15-20 строк)

**Keywords:** thermal insulating materials, of carbamide foams, updating.  
разделительный интервал

### References

\*Перечень ссылок, переведённый на английский язык (названия издательств, журналов и фамилии не переводить – писать в латинской транскрипции).

**Перечень библиографических ссылок обязателен!**

**Библиографические ссылки представить в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.**

### Примеры:

1. Благовещенский Ф. А., Букина Е. Ф. Архитектурные конструкции. М. : Архитектура-С, 2011. 232 с.
2. Строганов В. Ф., Сагадеев Е. В. Введение в биоповреждение строительных материалов. Казань, 2015. С. 156–161.
3. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р., Гайфуллин А. Р., Морозов В. П. Дегидратация глин различного минерального состава при прокаливании // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 388–394.
4. Тезисы докладов : сб. научных трудов 68-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2016. 357 с.
5. Абдрахманова Л. А., Ашрапов А. Х., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Структурные факторы деформирования и разрушения нанокompозитов на основе поливинилхлорида : сб. ст. VIII академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции / КГАСУ. Казань, 2014. С. 8–11.
6. Способ изготовления стальной опоры многогранного сечения : пат. 2556603 Рос. Федерация. № 2014121172/03 ; заявл. 26.05.14 ; опубл. 10.07.15, Бюл. № 19. 5 с.
7. Доклад начальника Главного управления по делам печати Н. Татищева министру внутренних дел, 1913 г. // РГИА, Ф. 785. Оп. 1. Д. 188. Л. 307.
8. Гушин Б. П. Журнальный ключ : статья // ПФА РАН. Ф. 900. Оп. 1. Ед. хр. 23. 5 л.
9. Теория машин // PROGNOSIS.RU : ежедн. интернет-изд. 2010. URL: <http://www.prognosis.ru/logos.html> (дата обращения: 02.12.2016).

### Примеры перевода перечня ссылок на английский язык:

1. Blagoveshchenskiy F. A., Bukina Ye. F. Architectural construction. M. : Architectura-C, 2011. 232 p.
2. Stroganov V. F., Sagadeyev Ye. V. Introduction to biodamage of building materials. Kazan, 2015. P. 156–161.
3. Rakhimov R. Z., Rakhimova N. R., Gayfullin A. R., Morozov V. P. Dehydration of clay of different mineral composition on ignition // Izvestiya KGASU. 2016. № 4 (38). P. 388–394.
4. Theses of reports : proceedings of the 68<sup>th</sup> All-Russian scientific conference, Kazan, 2016. 357 p.
5. Abdrakhmanova L. A., Ashrapov A. Kh., Nizamov R. K., Khozin V. G. Structural factors of deformation and destruction of nanocomposites based on polyvinylchloride : dig. of art. VIII academic readings of RAACS – International scientific-technical conference / KGASU. Kazan, 2014. P. 8-11.
6. A method of making steel support of multi-faceted cross-section : patent 2556603 of the Rus. Federation. № 2014121172/03 ; decl. 26.05.2014; publ. 10.07.2015. Bull. in № 19. 5 p.
7. Report of chief of Central administrative of the Press N. Tatischev to the Minister of Internal Affairs, 1913 y. // RGIA, F. 785. Op. 1. D. 188. L. 307.
8. Guschin B. P. Journal key : article // PFA RAS. F. 900. Op. 1. St. un. 23. 5 sh.
9. Theory of machines // PROGNOSIS.RU : daily. internet-edit. 2010. URL: <http://www.prognosis.ru/logos.html> (reference date: 02.12.2016).

В список библиографических ссылок вносятся только опубликованные работы.

Название статьи должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким. Аннотация (1 абзац от 500 до 1000 знаков с пробелами) должна ясно излагать содержание статьи и быть пригодной для самостоятельного опубликования.

В разделе «**Введение**» рекомендуется указать нерешенные ранее вопросы, сформулировать и обосновать цель работы и, если необходимо, рассмотреть ее связь с важными научными и практическими направлениями. Могут присутствовать ссылки на публикации последних лет в данной области, включая зарубежных авторов.

---

---

**Основная часть статьи** должна подробно освещать содержание исследований, проведенных автором (авторами). Полученные результаты должны быть освещены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными. Основная часть статьи может делиться на подразделы (с разъяснительными заголовками) и содержать анализ последних публикаций, посвященных решению вопросов, относящихся к данным подразделам.

В разделе **«Заключение»** должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения.

Язык публикации: русский или английский.

Подробные требования размещены на сайте журнала!

Если статья была или будет направлена в другое издание, необходимо сообщить об этом редакции. Ранее опубликованные статьи к рассмотрению не принимаются.

**От авторов в редакцию журнала предоставляются следующие материалы:**

- Два экземпляра статьи в четко распечатанном виде;
- Электронный вариант (Электронная версия статьи должна соответствовать варианту на бумажном носителе);
- Две рецензии (соответствующего уровня) от двух независимых организаций;
- Экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;
- Сопроводительное письмо в предлагаемой форме (см. сайт).

**Материалы к публикации вложить в полиэтиленовый файл.**

Датой поступления статьи считается день представления последнего из вышеуказанных материалов.

Представленные авторами научные статьи направляются на независимое закрытое рецензирование специалистам по профилю исследования, членам редакционной коллегии. Основными критериями целесообразности публикации являются новизна полученных результатов, их практическая значимость, информативность. В случае, когда по рекомендации рецензента статья возвращается на доработку, датой поступления считается день получения редакцией ее доработанного варианта. К доработанной статье в обязательном порядке прикладываются ответы на все замечания рецензента. Статьи, получившие отрицательные заключения рецензентов и не соответствующие указанным требованиям, решением редакционной коллегии журнала не публикуются и не возвращаются (почтовой пересылкой). Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей с сохранением авторского варианта научного содержания.

**Журнал «Известия КГАСУ» выходит 4 раза в год, тиражом 500 экз. Журнал является подписным изданием и включен в общероссийский каталог ОАО Агентства «РОСПЕЧАТЬ», индекс издания – 36939.**

**Авторы, являющиеся членами редколлегии и (или) подписчиками журнала, имеют преимущественное право на опубликование своих статей.**

**СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.**

**Научная статья в полном объеме будет также размещена на официальном сайте «Известия КГАСУ» – электронном научном издании (ЭНИ) <http://izvestija.kgasu.ru/> (Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008).**

**Все материалы направлять по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, ОПИР, комн. 79. Телефон (843) 510-46-39, 236-26-88 (тел./факс). E-mail: [patent@kgasu.ru](mailto:patent@kgasu.ru).**

**Банковские реквизиты:**

КГАСУ

420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1

ИНН 1655018025 КПП 165501001

Сч. 40501810292052000002

в ГРКЦ НБ РТ Банка России г. Казань

БИК 049205001

Л/с 20116Х06860

**Указать назначение платежа:** Код дохода: 0000000000000000130 реализация изд. деэт-ти.

---

---

**Известия КГАСУ**

2017 г., № 4 (42)

Гл. редактор: Низамов Р.К.

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Макет и редактирование: Бибикина А.Р.

Адрес редакции: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1

Тел. для справок: (843) 510-46-39

Журнал зарегистрирован: Регистр. ПИ № ФС77-25136

Электронное периодическое издание: <http://izvestija.kgasu.ru> Регистр. Эл № ФС 77-31046

Федеральная служба

по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия.

Индекс издания – 36939

Общероссийский каталог ОАО Агентства «РОСПЕЧАТЬ»

Подп. к печати 24.11.2017

Формат 60×84/8

Заказ 340

Бумага тип. № 1

Усл.-печ. л. 54,4

Уч.-изд. л. 54,9

Тираж 500 экз.

I завод-100

Отпечатано в Издательстве КГАСУ, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1