

NEWS



Kazan
State
University
Architecture
Engineering

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

Известия КГАСУ 2024 г., № 1(67)

ББК 38
И 33
УДК 69

Главный редактор: д-р техн. наук, проф., Академик АН РТ Р.К. Низамов
Зам. главного редактора: канд. техн. наук, доц. Е.А. Вдовин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Айдарова Г.Н., д-р арх., проф. советник РААСН;	Мирсяяпов Илизар Т., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН;
Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Мирсяяпов Илшат Т., д-р техн. наук, проф.;
Горячев М.Г., д-р техн. наук, проф.;	Стрелков А.К., 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.;	Тунакова Ю.А., д-р хим. наук, проф.;
Кичигин В.И., д-р техн. наук, проф.;	Углова Е.В., д-р техн. наук, проф.;
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;	Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;
Кочев А.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Шагидуллин Р.Р., д-р хим. наук, чл.-корр. АН РТ;
Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.;	Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Рольф Катценбах, д-р техн. наук, проф. (Германия);	Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);
Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);	Хассан Абдалла, д-р наук (PhD), проф. (Великобритания);
	Янотка И., д-р 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 в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации № ФС77-31046 от 25 января 2008г.). Включен в подписной каталог ГК «Урал - Пресс» индекс издания – 36939.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Тел. (843) 510-46-39

E-mail: patent@kgasu.ru Сайт: <http://izvestija.kgasu.ru>

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
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 KSUAE 2024, № 1(67)

BBC 38
I 33
UDC 69

Editor-in-Chief: Dr. tech. sci., prof., Academic of AS RT Nizamov R.K.
Deputy Editor-in-Chief: Cand. tech. sci., associate prof. Vdovin E.A.

EDITORIAL BOARD:

Aidarova G.N. Dr. arch. sci., prof., advisor of RAACS;	Mirsayapov Ilizar T., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. RAACS;
Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;	RAACS;
Goriachev M.G., Dr. tech. sci., prof.;	Mirsayapov Ilshat T., Dr. tech. sci., prof.;
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the Academy of RAACS;	Strelkov A.K., 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;
Kichigin V.I., Dr. tech. sci., prof.;	Tunakova Iu.A., Dr. chem. sci., prof.;
Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;	Uglova E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Kochev A.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. RAACS;	Khozin V.G., Dr. tech. sci., prof.;
Logachev K.I., Dr. tech. sci., prof.;	Shagidullin R.R., Dr. chem. sci., corr.-m. AS RT;
	Iakovlev G.I., Dr. tech. sci., prof.

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

Rolf Katzenbach, Dr. tech. sci., prof. (Germany);	Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);
Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of EAS, foreign member of RAACS (Israel);	Hassan Abdalla, PhD, prof. (Great Britain);
	Janotka I., Dr. 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 the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (the certificate on registration № FS77-31046, dated January, 25th, 2008). It is included in the subscription catalog of the Ural Press Group of Companies; subscription number 36939.

EDITORIAL ADDRESS:

420043, Tatarstan, Kazan, Zelenaya 1, office 79
Tel. (843) 510-46-39

E-mail: patent@kgasu.ru Web-site: <http://izvestija.kgasu.ru>



СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
Валиев А.И., Сулейманов А.М. Исследование деформативности, ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиками	6
Высоцкий М.М., Рыбина А.С., Савицкий В.В., Небратенко Д.Ю. Модификация окисленного битума термопластичными эластомерами различной топологии	14
Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1: Влияние изменения модуля упругости адгезива на напряженно-деформированное состояние железобетонной балки	23
Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2: Регулирование прогнозирование модуля упругости	32
Абдрахимов В.З. Рециклинг металлургического железосодержащего шлака в производстве керамического кирпича на основе гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита	41
Лесовик В.С., Денисов В.П., Кабалин М.Д., Высоцкая М.А. Обоснование выбора асфальтогранулобетонных смесей типов М и К с позиции совместной работы слоев основания и покрытия дорожной одежды	51
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	
Ванин И.В., Аriskин М.В. Эффективность применения в соединениях деревянных конструкций вклеенных резбовых шайб	63
Мирсаяпов Илшат Т., Павлов М.Н., Гайнетдинов Р.Г. Сопrotивление комбинированной (сталебетонной) балки	71
Сибгатуллина Л.Ш., Хабибулина А.Г., Сибгатуллин А.М. Опыт проектирования и строительства репродукторов II-го порядка	83
ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ	
Мирсаяпов Илизар Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р., Нуриева Д.М. Влияние конструкции фундамента и грунтового основания на снижение уровня вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена	96
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства	107
Сират Д., Руденко А.А. Многофакторность модели и оценки эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов	117
Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати	127
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Еремеев П.В., Шмелев Г.Н. Определение нормальных напряжений в металлических стержневых конструкциях при произвольном сочетании усилий и кручении с учетом пластических деформаций при циклическом нагружении	135
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ	
Белоглазова Т.Н., Романова Т.Н. Планирование перспективных направлений развития газораспределительной системы	146
ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ	
Медведева С.Н., Власова А.Ю., Вилданов Р.Р. Анализ качества воды хозяйственно-питьевого назначения в г. Казань за 2021-2022 год	157
ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ	
Надырова Х.Г., Хайруллина А.Т. Архитектурно-планировочные особенности здания психиатрической клиники начала XX вв. в Казани	168
Киносьян М.А., Киносьян Н.С. Творчество видных казанских архитекторов в послевоенный период (1946-50 гг.) в контексте национально-региональных традиций	182
Фазлеев М. Ш., Дияров Р. Н. Развитие рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани и повышение ее туристической привлекательности	193
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	
Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Проектирование дорожных одежд со слоями из модифицированных кремнийорганическими соединениями цементогрунтов	207
Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»	217



CONTENTS

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
Valiev A.I., Sulejmanov A.M. Study of deformability, creep behavior of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics	6
Vysotsky M.M., Rybina A.S., Savitsky V.V., Nebratenko D.Yu. Modification of oxidized bitumen with thermoplastic elastomers of various topologies	14
Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 1: The effect of changes in the modulus of elasticity on the stress-strain state of a concrete beam reinforced with an external reinforcement system	23
Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 2: Regulation and prediction of changes in the elastic modulus of epoxy adhesives depending on the filler content	32
Abdrakhimov V.Z. Recycling of metallurgical iron-containing in the production of ceramic bricks based on hydrosilicic low-melting clay with an admixture of montmorillonite	41
Lesovik V.S., Denisov V.P., Kabalin M.D., Vysotskaya M.A. Justification for the choice of asphalt granulocement mixtures of types M and K from the position of joint work of base layers and pavement surface	51
BUILDING STRUCTURES, HOUSES	
Vanin I.V., Ariskin M.V. The effectiveness of the use of glued threaded washers in the joints of wooden structures	63
Mirsayapov Ilshat T., Pavlov M.N., Gainetdinov R.G. Resistance of a composite (steel-concrete) beam	71
Sibgatullina L.Sh., Khabibullina A.G., Sibgatullin A.M. Experience in design and construction of 2 nd order reproducers	83
FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES	
Mirsayapov Ilizar T., Khasanov R.R., Safin D.R., Nurieva D.M. Influence of the foundation and soil structure on reducing the level of vibrations arising from the movement of metro trains	96
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION	
Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina, L.V. Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP)	107
Serat J., Rudenko A.A. Multifactor model and assessment of the efficiency of production structures during the construction of technically complex facilities	117
Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing	127
CONSTRUCTION MECHANICS	
Eremeev P.V., Shmelev G.N. Determination of normal stresses in metal rod structures under an arbitrary combination of forces and torsion, taking into account plastic deformations under cyclic loading	135
HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS AND LIGHTING	
Beloglazova T. N., Romanova T. N. Planning of perspective directions of gas distribution system development	146
WATER SUPPLY, SEWERAGE, WATER CONSERVATION CONSTRUCTION	
Medvedeva S.N., Vlasova A.Yu., Vildanov R.R. Analysis of the quality of drinking water in Kazan in the period of 2021-2022	157
ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY, HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION	
Nadyrova Kh.G., Khairullina A.T. Architectural and planning features of the psychiatric clinic building of the early XX century in Kazan	168
Kinosyan N.S., Kinosyan M.A. Creativity of prominent Kazan architects in the post-war period (1946-50) in the context of national and regional traditions	182
Fazleev M. Sh., Diyarov R. N. Development of the recreational environment on the territory of the park named after Petrova of Kazan and increasing its tourist attractiveness	193
DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS	
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Design of road pavements with layers of soil-cement modified with organosilicon	207
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	217



УДК: 691.175.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1

EDN: AEGJCS



Исследование деформативности, ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков

А.И. Валиев¹, А.М. Сулейманов¹²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Одним из методов улучшения жесткостных характеристик стеклопластиков в строительной практике является их внешнее армирование с применением углеродных композитов. Деформативность таких систем обусловлена как подбором компонентов, так и изучением их ползучести. Целью данной работы является исследование деформативности, температурно-временной зависимости ползучести стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидных адгезивах с различным количеством пластификаторов. Задачами исследования является: исследование деформирования стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидном связующем с различным содержанием пластификаторов в области упругих деформаций при нормальной температуре, исследование ползучести образцов на четырехточечный изгиб методом ступенчатых изотерм.

Результаты. Исследована деформативность, температурно-временная зависимость ползучести системы «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань». По кривым ползучести с увеличением пластификаторов в составе эпоксидной смолы наблюдается увеличение деформативности систем в исследуемых температурных интервалах. Предложен подход к экспериментальному исследованию температурно-временной зависимости ползучести систем с использованием метода ступенчатых изотерм.

Выводы. Значимость полученных результатов в строительной отрасли заключается в использовании метода ступенчатых изотерм для экспериментального исследования температурно-временной зависимости ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков и рекомендовано при решении научных и инженерных задач.

Ключевые слова: клеевые связующие, стеклопластик, углеродная ткань, система внешнего армирования, ползучесть

Для цитирования: Валиев А.И., Сулейманов А.М. Исследование деформативности, ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 6-13, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1, EDN: AEGJCS

Study of deformability, creep behavior of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics

A.I. Valiev¹, A.M. Sulejmanov¹²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* One of the methods of improving the stiffness characteristics of FRP in construction practice is their external reinforcement with the use of carbon composites.

The deformability of such systems is due to both the selection of components and the study of their creep. The purpose of this work is to study the deformability, temperature and time dependence of creep of fiberglass plastics externally reinforced with carbon fabrics on epoxy adhesives with different amounts of plasticizers. The objectives of the study are: investigation of deformation of fiberglass plastics externally reinforced with carbon fabrics on epoxy binder with different content of plasticizers in the area of elastic deformations at normal temperature, investigation of the creep of samples on four-point bending by the method of step isotherms.

Results. We investigated the deformability, temperature-time dependence of creep of the system "pultrusion fiberglass - epoxy adhesive compositions with different amounts of plasticizers - carbon fabric". According to creep curves with the increase of plasticizers in the composition of epoxy resin, an increase in the deformability of the systems in the studied temperature intervals is observed. An approach to the experimental investigation of the temperature-time dependence of creep of systems using the method of step isotherms is proposed.

Conclusions. The significance of the obtained results in the construction industry lies in the use of the method of step isotherms for the experimental study of the temperature-time dependence of the creep of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics and is recommended in solving scientific and engineering problems.

Keywords: adhesive binders, fiberglass, carbon fabric, external reinforcement system, creep

For citation: Valiev A.I., Sulejmanov A.M. Study of deformability, creep behavior of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 6-13, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1, EDN: AEGJCS

1. Введение

Одним из эффективных, долговечных, стойких к агрессивным средам материалов является полимерный композиционный материал [1,2]. В строительной практике полимерные композиты нашли применение при изготовлении пешеходных мостовых сооружений, в системах для замены стальной арматуры в железобетонных настилах, системах для усиления бетона, деревянных и каменных конструкций и др. [3-5].

Определяющим фактором, сдерживающим широкое применение конструкционных полимерных композитов в строительной сфере, является то, что для сооружений, выполненных из полимерных композитов, к примеру, из стеклопластика, по аналогичной конструктивной схеме из металла не всегда выполняется определяющее условие проверки на прочность согласно второму предельному состоянию (по деформациям), что приводит к увеличению поперечных сечений, уменьшению шага конструктивных элементов, стоимости [6-8]. Одним из решений данной проблемы является улучшение жесткостных характеристик материала путем их внешнего армирования с применением углеродных композитов. Однако, при выполнении систем «стеклопластик – клеевой состав – углеродная ткань» необходим комплексный подбор компонентов, в особенности клеевого состава, изучение их деформативности при нормальной температуре, ползучести, в частности климатической стойкости, для достижения требуемой долговечности [9-11].

Вопросам прогнозирования, построения кривых ползучести и их верификации на основе численных моделей посвящено большое количество работ, моделирование поведения упруго-механических характеристик во времени, термомеханического поведения и процессов разрушения представляет большой интерес и предполагает выбор, разработку адекватных методик по результатам анализа свойств и области применения [12-14]. Одним из апробированных методов прогнозирования климатической стойкости для систем внешнего армирования строительных конструкций, в частности железобетонных, является метод ступенчатых изотерм, который основан на испытании одиночного образца с заданным постоянным напряжением и пошаговым увеличением температуры с целью ускорения ползучести [15-17].

Целью работы является исследование деформативности, температурно-временной зависимости стеклопластиков, внешне армированных однонаправленными углеродными тканями на эпоксидных адгезивах с различным количеством пластификаторов.

Для достижения цели необходимо:

- исследование деформирования стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидном связующем с различным содержанием пластификаторов в области упругих деформаций при нормальной температуре испытаний;
- исследование ползучести образцов на четырехточечный изгиб методом ступенчатых изотерм.

2. Материалы и методы

Для проведения исследований систем «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань» были изготовлены плоские образцы балок прямоугольного сечения шириной 40 мм, высотой 4 мм, общей длиной 30,5 мм. Конструкция, размеры, материалы опытных образцов определены в соответствии с поставленными задачами и возможностями по изготовлению и испытанию образцов.

В качестве материалов систем применялись:

- 1) Пултрузионный стеклопластик на основе полиэфирных смол производства ООО «Татнефть-Пресскомполит»;
- 2) Однонаправленная углеродная ткань FibArm Tape 230 производства АО «Юматекс» (Госкорпорация «Росатом»);
- 3) Адгезивы на основе эпоксидной смолы РекАРМ – D5,...D10,...D30 (D-количество пластифицирующей добавки (дибутилфталата) от 5 до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы) и смесевых отвердителей аминного типа компании ООО «Рекон». Выявлено, что с увеличением количества пластификаторов в составе эпоксидной смолы уменьшается прочность при растяжении, модуль упругости. Результаты испытаний клеевых составов на растяжение приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний клеевых составов

Эпоксидные составы	РекАРМ-D5	РекАРМ-D10	РекАРМ-D30
Прочность при растяжении, МПа	38-44	45-50	17-18
Модуль упругости при растяжении, ГПа	6,1	5,5	2-3

Технологический процесс подготовки поверхностей к склеиванию является одним из определяющих при формировании несущей способности, долговечности систем.

Нами выделены следующие этапы разработки систем:

- 1) Очистка поверхности пластин из стеклопластика с помощью наждачной бумаги;
- 2) Обезжиривание ацетоном поверхности пластин из стеклопластика и углеродной ткани;
- 3) Приклеивание углеродной ткани в растянутой зоне с помощью соответствующих адгезивов на полиэтиленовых листах;
- 4) Выдерживание опытных образцов при нормальной температуре ((20±2) °С) и влажности ((50-55) %) в течении 7 суток.

Оценка деформативности систем для плоских образцов на четырехточечный изгиб в области упругих деформаций при нормальной температуре выполнено по ГОСТ 56805-2015. Схема испытания, экспериментальный стенд приведены на рис.1. Нагружение образцов производилось при помощи гидравлического домкрата, для измерения прогибов был установлен индикатор часового типа. Измерение нагрузки производилось по манометру.

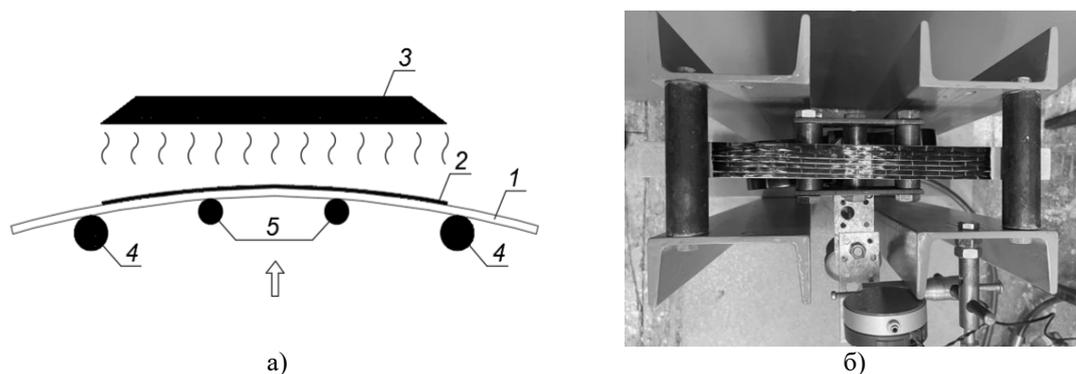


Рис. 1. а) схема испытания (1 – стеклопластик; 2 – углеродная ткань, 3 – электронагреватель, 4 – опоры, 5 – наконечники) б) вид сверху экспериментального стенда (иллюстрация авторов)

Fig. 1. a) test scheme (1 - fiberglass; 2 - carbon fiber, 3 - electric heater, 4 - supports, 5 - tips) b) top view of the experimental stand (illustration by the authors)

Определение ползучести систем производилось методом ступенчатых изотерм. К лабораторным образцам прикладывалась постоянная нагрузка (50% от средней разрушающей), пошаговая температура (шаг 5°C) с использованием электронагревателя. Деформации фиксировались с помощью микрометра. Испытания продолжались до разрушения образца/до завершения ползучести. Для оптимизации процесса проведения испытаний разработана компьютерная программа, фиксирующая прогибы и прикладываемую силу и автоматически высчитывающая предел прочности, модуль упругости с построением необходимых графиков.

3. Результаты и обсуждение

Результаты исследования систем на четырехточечный изгиб при нормальной температуре испытаний в области упругих деформаций представлено на рис. 2.

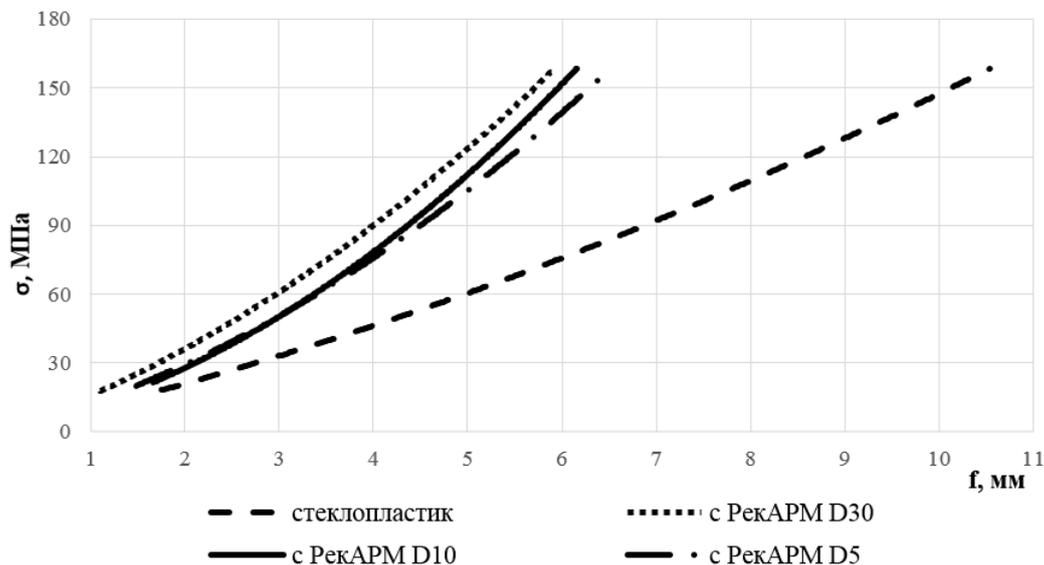


Рис. 2. Диаграмма «напряжения-прогибы» образцов стеклопластика, систем «стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным содержанием пластификаторов – углеродная ткань» в области упругих деформаций (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Deformation diagram of FRP samples, systems "FRP - epoxy adhesive compositions with different content of plasticizers - carbon fabric" in the area of elastic deformations (illustration by the authors)

Согласно диаграмме «напряжения-прогибы (определены по индикатору часового типа)», наибольшей деформативностью обладают стеклопластики, все системы «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань» положительно влияют на уменьшение прогибов,

близки между собой. Предполагаем, увеличение количества пластификаторов в составе эпоксидной смолы способствует повышению эластичности, небольшому увеличению модулей упругостей систем на четырехточечный изгиб при нормальной температуре испытаний.

Одно лишь увеличение предела прочности пултрузионного стеклопластика путем склеивания углеродных композитов в растянутой зоне при нормальной температуре испытаний для достижения требуемой долговечности недостаточно. С этой целью были проведены испытания ползучести систем с использованием составов РекАРМ–D5,...D10,...D30 при температурах от 25°C с шагом 5°C методом ступенчатых изотерм. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

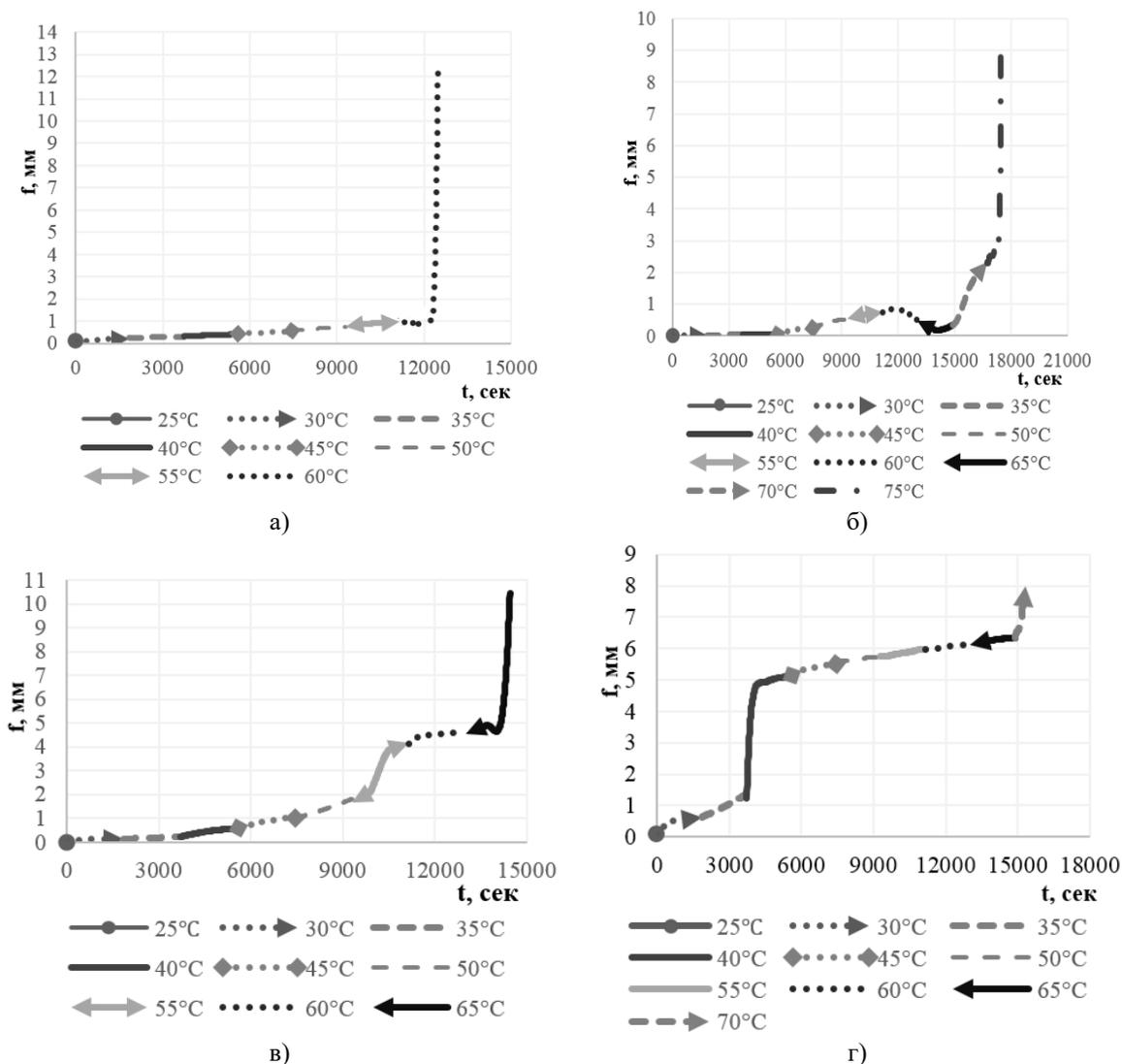


Рис. 3. Кривые ползучести а) стеклопластика; систем «стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным содержанием пластификаторов – углеродная ткань»: б) с РекАРМ D5; в) с РекАРМ D10; г) с РекАРМ D30 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Creep curves of a) fiberglass; systems "fiberglass - epoxy adhesives with different content of plasticizers - carbon fabric": b) with RekARM D5; c) with RekARM D10; d) with RekARM D30 (illustration by the authors)

Хрупкое разрушение пултрузионного стеклопластика при заданном постоянном напряжении происходило при 60°C через 3,3 ч. ступенчатого нагрева образца, для разработанных систем наблюдается отклеивание углепластика от стеклопластика с последующим хрупким разрушением стеклопластика с РекАРМ D5 при 60°C через 3,3 ч., с РекАРМ D10 при 55°C через 2,9 ч., с РекАРМ D30 при 40°C через 1,1 ч. испытания. Необходимо отметить, что при формировании систем также важным является обеспечение хорошей степени подготовленности поверхностей к склеиванию,

смачиваемости углеродных волокон в эпоксидных клеевых составах, адгезии органических смол к неорганическим волокнам, которая может достигаться за счет применения необходимых аппретов при получении волокон либо модификацией клеевых составов (за счет применения реакционноспособных термопластов, введением наночастиц различной природы и др.).

На рис. 4 приведены прогнозируемые кривые ползучести систем с различными клеевыми составами.

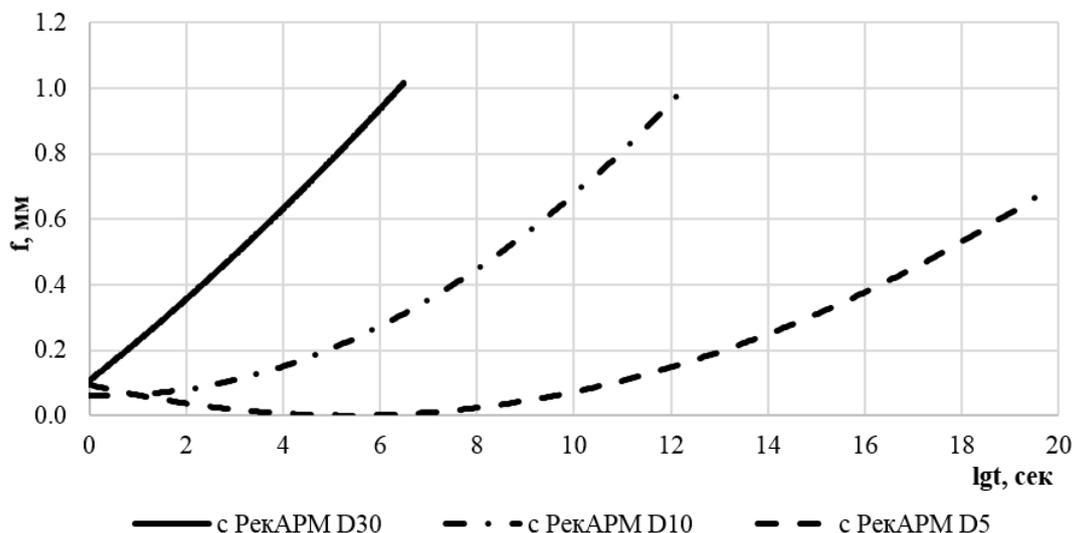


Рис. 4. Прогнозируемые кривые ползучести систем (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Predicted creep curves of systems (illustration by the authors)

По прогнозируемым кривым ползучести наглядно видно, что с увеличением пластификаторов в составе эпоксидной смолы наблюдается увеличение деформативности систем (с РекАРМ D30 > D10 > D5) в исследуемых температурных интервалах, уменьшение долговечности.

Разработка подходов к экспериментальному исследованию ползучести отдельных систем с использованием метода ступенчатых изотерм широко используется при анализе и прогнозировании кривых ползучести. Так, в работах [16, 17] методом ступенчатых изотерм получены единые обобщенные кривые, позволяющие прогнозировать долгосрочную деформацию ползучести и срок службы железобетонных балок, усиленных углепластиком. Увеличение скорости ползучести системы позволило выявить, что ползучесть бетона и углепластика обусловлена своего рода проскальзыванием адгезионного слоя между бетоном и углепластиком.

Учитывая вышеизложенное, необходимы также дальнейшие исследования физико-механических характеристик систем уже с учетом всех воздействий эксплуатационных факторов (УФ-излучение и др.) с определением коэффициентов условий работы систем с разработкой инструментариев для их оперативного определения.

4. Заключение

В данной работе представлены результаты исследований систем «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань»:

1. Выявлено, что одно лишь уменьшение прогибов систем с различными клеевыми связующими (результаты деформирования близки между собой) при нормальной температуре испытаний не является гарантом выбора компонентов для обеспечения требуемой долговечности;

2. Предложен подход к экспериментальному исследованию температурно-временной зависимости ползучести для стеклопластиков, внешне армированных углепластиком для плоских образцов в лабораторных условиях с использованием метода ступенчатых изотерм;

3. Для исследуемых систем с увеличением количества пластификатора в составах эпоксидных смол наблюдается увеличение деформативности систем в исследуемых температурных интервалах;

4. Для повышения эффективности стеклопластиков, внешне армированных углепластиками, необходимым является исследование всех воздействий основных эксплуатационных факторов, разработка инструментариев (численных и эмпирических) для моделирования работы систем в заданных условиях, а также прогностического аппарата для оценки их работоспособности.

Список литературы/ References

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. [Kablov E.N. Materials of new generation and digital technologies of their processing // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. № 4. P. 331-334.]
2. Ашрапов А. Х., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Исследование поливинилхлоридных композиций с углеродными нанотрубками // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2011. – Т. 3, № 3. – С. 13-24. – EDN OAKNHP. [Ashrapov A. H., Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K., Khozin V. G. Investigation of polyvinyl chloride compositions with carbon nanotubes // Nanotechnology in construction: scientific online journal. - 2011. – Volume 3, No. 3. – pp. 13-24. – ED. OAKNHP.]
3. Богаева И.О., Никишина Ю. С. Направления и практика при создании современных строительных композиционных материалов // Студенческий вестник. — 2022. — № 38-4(230). — С. 5-9. [Bogaeva I.O., Nikishina Yu.S. Directions and practice in the creation of modern construction composite materials // Student Bulletin. - 2022. - No. 38-4(230). — P. 5-9]
4. Цыгвинцев, И.В., Постникова П.И., Сенцов И.В. Применение композитных материалов в строительстве // Инновационное развитие. — 2017. — № 7(12). — С. 26–29. [Tsygvintsev I.V., Postnikova P.I., Sentsov I.V. Application of composite materials in construction // Innovative development. – 2017; No 7(12): P. 26-29.]
5. Евдокимов А.А., Имамединов Э.Ш., Малаховский С.С. Усиление строительных конструкций из бетона системой внешнего армирования из углепластика // ТРУДЫ ВИАМ №10 (92) 2020. [Evdokimov A.A., Imametdinov E.Sh., Malakhovskiy S.S. Strengthening concrete building structures via external reinforcement system from carbon plastic// PROCEEDINGS OF VIAM No. 10 (92) 2020.] DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-73-80.
6. Кугаевский Н.М., Овчинников И.И. Оценка эффективности усиления железобетонных балок пролетных строений автодорожных мостовых сооружений полимерными композиционными материалами // Вестник Евразийской науки, 2021 №2, <https://esj.today/PDF/09SAVN221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. [Kugaevskiy N.M., Ovchinnikov I.I. (2021). Assessment of the effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams of superstructures of road bridges with polymer composite materials. The Eurasian Scientific Journal, [online] 2(13). Available at: <https://esj.today/PDF/09SAVN221.pdf> (in Russian)]
7. Валиев А.И., Сулейманов А.М. Гибридные полимерные композиты конструкционного назначения // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 51–57. [Valiev A.I., Suleimanov A.M. Hybrid polymer composites for structural purposes. Zhilishchnoe Stroitelstvo [Housing Construction]. 2023. No. 12, P. 51-57] DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-51-57>
8. Низамов Р. К., Галеев Р. Р., Абдрахманова Л. А. Обоснование эффективности наполнения ПВХ-композиций тонкодисперсными отходами металлургических производств// Строительные материалы. – 2005. – № 7. – С. 18-20. – EDN HZFWBT. [Nizamov R. K., Galeev R. R., Abdrakhmanova L. A. Substantiation of the effectiveness of filling PVC compositions with finely dispersed waste from metallurgical industries // Building materials. – 2005. – No. 7. – pp. 18-20. – EDN HZFWBT.]

9. Алексеев Н.Н., Коваленко И.А., Столяров О.Н., Мельников Б.Е. Вязкоупругие свойства геосинтетических материалов, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №5 (56). С. 17-32. [Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Viscoelastic properties of geosynthetic materials, Construction of Unique Buildings and Structures, 2017; No 5(56). P.17-32.]
10. Старовойтова И.А., Шакиров А.Р., Зыкова Е.С., Семёнов А.Н., Сулейманов А.М. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций // Строительные материалы. 2021. № 1–2. С. 98–104. [Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zyкова E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. the study of physical and mechanical characteristics of modified adhesive binders for systems of external reinforcement of building structures // Building Materials. 2021. № 1-2. P. 98-104.] DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104>.
11. / J. Schalnat, A. Krairi, T. Wieme, W. Van Paeppegem. Experimental characterization of thermoplastics for use in heat exchangers: presented at the ICEM 2018. Brussels. 2018. Vol. 2. № 8.
12. Kuhl A., Munoz-Rojas P., Munoz-Rojas A., Barbieri R., Benvenuti I.J. A procedure for modeling the nonlinear viscoelastoplastic creep of HDPE at small strains // Polymer engineering and science, 2017, vol. 57, P. 144 - 152.
13. Bergstrom J.S. Mechanics of Solid Polymers. Theory and computational modeling, Elsevier, William Andrew, 2015, 520 p.
14. De Pascalis R., Abrahams I.D., Parnell W.J. On nonlinear viscoelastic deformations: a reappraisal of Fung's quasi-linear viscoelastic model // Proceedings of the Royal Society A. 2014, V.470, 20140058. doi: 10.1098/rspa.2014.0058.
15. Regalado, Arturo & Carpenter, Brice & Jáuregui, David & Weldon, Brad. (2017). Performance Evaluation of a Reinforced Concrete Slab Bridge Retrofitted with Carbon Fiber Reinforcement Polymer Laminate System. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2642. 68-76. 10.3141/2642-09.
16. Сулейманов А.М., Шакиров А.Р. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 10–17. [Suleymanov A.M., Shakirov A.R. Experimental study of the stress-strain state of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber. 2023. No. 4. P. 10-17.] DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X2023-812-4-10-17>
17. Shakirov, Almaz & Suleymanov, Alfred. (2021). Prediction of Creep for a Reinforced Concrete Beam Strengthened with an External Reinforcement System Using the Stepped Isothermal Method. 10.1007/978-3-030-80103-8_12.

Информация об авторах

Валиев Алмаз Илсурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tatcomposite@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Information about the authors

Almaz I. Valiev, postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: tatcomposite@mail.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

УДК: 665.775.4, 625.7/8
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.2
EDN: AGMZLQ



Модификация окисленного битума термопластичными эластомерами различной топологии

М.М. Высоцкий¹, А.С. Рыбина¹, В.В. Савицкий¹, Д.Ю. Небрatenко¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Модифицированные битумы достаточно широко используются в дорожном строительстве. Обеспечение стабильной клеящей способности вяжущих к минеральным материалам различной природы является причиной использования в составе вяжущих эластомеров и термоэластопластов различного состава и строения. Таким образом возможно выполнение основных требований к качеству битумных вяжущих: стабильность высокого уровня технологических и эксплуатационных свойств. Цель исследования – сравнительная оценка влияния на свойства битумов окисленных нефтяных дорожных вязких синтетических термоэластопластов различного химического строения.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Оценка качественных показателей исходного битума нефтяного дорожного вязкого БНД 100/130 на соответствие требованиям нормативной литературы.
2. Получение смесевых композиций на основе исходного битума и двух полимерных модификаторов различного состава и строения
3. Определение влияния модифицирующего действия бутадиен-стирольного термоэластопласта и 1,2-полибутадиена на технологические и эксплуатационные свойства полученных битумных вяжущих.

Результаты. Выполнено сравнение базовых характеристик сырьевых материалов многокомпонентной системы: окисленный нефтяной битум и термопластичные эластомерные материалы двух типов. Проведено исследование количественного влияния модифицирующих агентов: линейного бутадиен-стирольного термоэластопласта (ПАО «Нижекамскнефтехим») и синдиотактического 1,2-полибутадиена («Japan Synthetic Rubber Co.»). Выявлена динамика изменения показателей свойств битума, модифицированного отдельно каждым термоэластопластом в количестве от 0 до 5 масс. %. Показано, что для достижения существующих нормативных требований к полимерно-битумным вяжущим целесообразно использовать бутадиен-стирольный термоэластопласт линейного строения. Для синдиотактического 1,2-полибутадиена отмечена повышенная, в сравнении с синтетическим бутадиен-стирольным полимером, растворимость в сложных многокомпонентных нефтепродуктах, что является безусловным преимуществом при создании высоко насыщенных растворных композиций.

Выводы. Показана эффективность применения полимерных материалов типа термоэластопластов для регулирования качественных показателей битумных вяжущих и отмечена целесообразность применения различных по составу модифицирующих агентов при подборе составов на основе PG-классификации вяжущих.

Ключевые слова: бутадиен-стирольный термоэластопласт, синдиотактический 1,2-полибутадиен, полимерно-битумное вяжущее

Для цитирования: Высоцкий М.М., Рыбина А.С., Савицкий В.В., Небрatenко Д.Ю. Модификация окисленного битума термопластичными эластомерами различной топологии // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 14-22, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.2, EDN: AGMZLQ

Modification of oxidized bitumen with thermoplastic elastomers of various topologies

M.M. Vysotsky¹, A.S. Rybina¹, V.V. Savitsky¹, D.Yu. Nebratenko¹

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

Abstract. Problem Statement. In recent years, modified bitumen has been widely used in road construction. One of the main requirements for the quality of bitumen binders is a stable adhesive ability to mineral materials of various nature and the stability of technological and operational properties over time. The modification of bitumen by elastomers of various composition and structure contributes to the increase of these indicators. The purpose of the study is a comparative assessment of the effect of oxidized petroleum road viscous synthetic thermoplastic elastomers of various chemical structures on the properties of bitumen.

To achieve the goal, the following tasks were solved:

1. Study of the properties of road binders modified with individual polymers of the class of thermoplastics.
2. Determination of the effectiveness of the use of synthetic thermoplastic elastomers based on butadiene monomers as modifying agents for petroleum road bitumen.

Results. The initial stage of the study was to assess the basic characteristics of the raw materials of the multicomponent system: oxidized petroleum bitumen and thermoplastic elastomeric materials of two types.

Investigation of quantitative influence of modifying agents was carried out using butadiene styrene thermoplastic elastomer and syndiotactic 1,2 polybutadiene. During the experiment the dynamics of changes of bitumen properties indices has been revealed, modified separately by each thermoplastic elastomer in an amount from 0 to 5 wt. %. It has been shown that in order to reach the existing normative requirements for polymer-bitumen binders it is advisable to use linear butadiene styrene thermoplastic elastomer. For syndiotactic 1,2 polybutadiene an increased, in comparison with SBS-polymer, solubility in complex multicomponent oil products has been noted. This is an absolute advantage while creating highly saturated mortar compositions.

Conclusions. The conducted studies demonstrate the effectiveness of the use of polymer materials such as thermoplastics to regulate the quality indicators of bitumen binders. The expediency of using modifying agents of different composition is evaluated. Due to the imminent introduction of the main provisions of the volumetric and functional design system, the data obtained can be used for the development of bitumen binders of different PG brands. Therefore, it is considered important to continue research in the field of mixed compositions based on thermoplastics of various chemical structures in order to optimize the compositions of road binders modified with polymers.

Keywords: butadiene styrene thermoplastic elastomer, syndiotactic 1,2 polybutadiene, polymer-bitumen binder (PmB)

For citation: Vysotsky M.M., Rybina A.S., Savitsky V.V., Nebratenko D.Yu. Modification of oxidized bitumen with thermoplastic elastomers of various topologies // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 14-22, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.2, EDN: AGMZLQ

1. Введение

Расширение температурного интервала эффективной работоспособности битумных вяжущих – одна из основных задач современного дорожного материаловедения. На протяжении десятков лет обычные окисленные битумы нефтяные дорожные вязкие (БНД) являются основным вяжущим при проведении строительных и ремонтных работах на автомобильных дорогах Российской Федерации [1]. Однако указанный тип вяжущего обладает повышенной хрупкостью в диапазоне отрицательных температур, наблюдающихся в зимний период более чем на 90% территории нашей страны. Такое изменение физико-химических свойств битумного вяжущего приводит к образованию

трещин в различных слоях асфальтобетонного покрытия и вынужденному ремонту уже в течении первых двух лет с момента введения дороги в эксплуатацию. В случае применения мягких битумных вяжущих (с высокой пенетрацией) указанных явлений можно было бы избежать – морозостойкость смесевых составов на их основе заметно лучше [2-4]. Однако при положительных температурах на поверхности асфальтобетонного покрытия, полученного на битумах с высокими значениями пенетрации, наблюдается появление сдвиговых деформаций, которые в дальнейшем, под воздействием нагрузки колесных пар, проявляют накопительный эффект.

Из выше описанного следует, что типовые битумы на основе окисленного нефтяного сырья могут обеспечить эффективную работоспособность только в диапазоне температур от минус 20 °С до плюс 50 °С, то есть общий температурный диапазон составляет не более 70 °С. Требуемый же диапазон в большей части регионов Российской Федерации составляет 140 °С (в пределах от минус 63 °С до плюс 67 °С). В названных условиях асфальтобетон на основе любой из выпускаемых марок БНД не может обеспечить длительный безремонтный срок эксплуатации автодорог [1].

Известно, что наиболее широко применяемыми в России и в мире эластомерными модификаторами битумов являются синтетические бутадиен-стирольные термоэластопласты (СБС-полимеры, БС ТЭП) [5-7]. Полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) на основе СБС-полимеров, соответствующие ГОСТ Р 52056-2003, являются более предпочтительными для производства полимерасфальтобетонных смесей (ПАБС), чем ординарные битумы окисленные нефтяные дорожные вязкие (БНД) ввиду более широкого температурного интервала эксплуатации покрытий на их основе, прекрасной пластичности и большей эластичности ПАБС в сравнении с традиционными асфальтобетонными смесями (АБС). Наряду с широко используемыми бутадиен-стирольными термоэластопластами все чаще рассматриваются и другие полимерные материалы, так же относящиеся к классу термоэластопластов. Это объясняется уникальной способностью термоэластопластов соответствовать реологическим требованиям битумных вяжущих при различных условиях их переработки (прежде всего температурных) и эксплуатации покрытий на их основе. Постоянно расширяющийся спектр синтезируемых высокомолекулярных соединений, способных существенно скорректировать свойства ординарных окисленных битумов, открывает для технологов и исследователей новые перспективные возможности [11- 13].

Цель исследования является сравнительная оценка влияния на свойства битумов окисленных нефтяных дорожных вязких синтетических термоэластопластов различного химического строения и анализ возможности их использования в качестве полимерных модификаторов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Оценка качественных показателей исходного битума нефтяного дорожного вязкого БНД 100/130 на соответствие требованиям нормативной литературы.
2. Получение смесевых композиций на основе исходного битума и двух полимерных модификаторов различного состава и строения
3. Определение влияния модифицирующего действия бутадиен-стирольного термоэластопласта и 1,2-полибутадиена на технологические и эксплуатационные свойства полученных битумных вяжущих.

2. Материалы и методы исследования

Модификация битумов нефтяных дорожных окисленных в нашей стране более чем в 90% случаев проводится с применением бутадиен-стирольных термоэластопластов. Ранее авторами выполнены исследования по модификации вяжущих бутадиен-стирольными термоэластопластами, производимыми на АО «Воронежсинтезкаучук» (г. Воронеж) [7]. В работе представлены результаты аналогичных исследований, однако в качестве модификатора использован отечественный полимер марки SBS-330L линейного строения, выпускаемый ПАО «Нижекамскнефтехим» (Республика Татарстан, г. Нижнекамск), отличающийся достаточно высокой молекулярной массой, эластичностью и относительным удлинением. СБС-полимеры представляют собой двухфазную систему, дисперсионной фазой которой являются домены полистирола. Распределение частиц

дисперсной фазы (бутадиеновые звенья) узкое, а расстояние между ними имеет единственный максимум в области 25 нм. Средняя молекулярная масса $M_n = 25 \cdot 10^4$ [5, 7, 12]. Схематично макромолекула бутадиен-стирольного термоэластопласта представлена на рис.1.

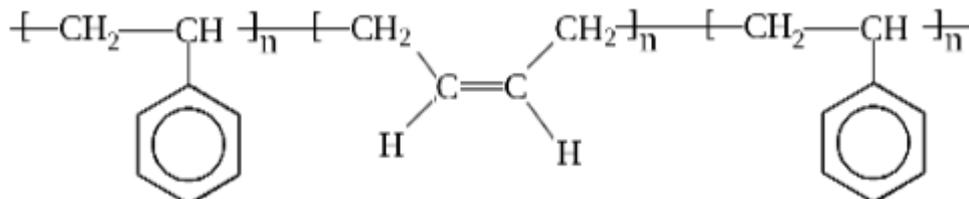


Рис. 1. Структура макромолекулы бутадиен-стирольного термоэластопласта (иллюстрация авторов)

Fig. 1. The structure of the macromolecule of styrene-butadiene thermoplastics (illustration by the authors)

В работе так же использовался синдиотактический 1,2-полибутадиен (1,2-СПБ), получаемый стереоспецифической полимеризацией бутадиена. В отличие от 1,4-полибутадиенов и 1,2-полибутадиена атактического строения, 1,2-СПБ проявляет свойства термоэластопласта, т.е. сочетает эластичность вулканизированных каучуков со способностью переходить в вязкотекучее состояние при повышенных температурах и перерабатываться подобно термопластичным полимерам. Промышленное производство 1,2-СПБ (JSR RB) освоено фирмой «Japan Synthetic Rubber» (Япония) [10, 13]. Определенные успехи в проведении аналогичных работ по синтезу 1,2-СПБ достигнуты и в России [11, 14, 15].

Согласно [16] строение макромолекул 1,2-СПБ можно представить в следующем образом:

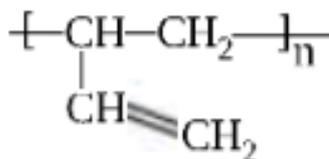


Рис. 2. Структура макромолекулы синдиотактического 1,2-полибутадиена (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Structure of macromolecules of syndiotactic 1,2-polybutadiene (illustration by the authors)

При высоком содержании 1,2-звеньев (90-95%) и соответствующей средней молекулярной массе $M_n = (90-120) \cdot 10^3$, синдиотактический 1,2-полибутадиен имеет кристалличность до 35% [10, 14, 16].

Количественные показатели использованных в работе термоэластопластов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические характеристики термоэластопластов SBS-330L и JSR RB 830

№ п/п	Наименование показателя	SBS-330L	JSR RB 830
1	Плотность, г/см ³	1,01	0.909
2	Содержание 1.2-звеньев, %	12-18	93
3	Показатель текучести расплава при 150 °С	0-1	3
4	Температура плавления, °С	199	105
5	Температура хрупкости, °С	---	- 36
6	Модуль упругости при удлинении 300 %, МПа	2.9	7.8
7	Прочность при растяжении, МПа	18.0	12.7
8	Относительное удлинение, %	750	670
9	Твердость по Шору А, условные единицы	74	99
10	Термоусадка, %	---	0.3-0.6
11	Молекулярная масса, $M_w \times 10^3$	250	116

В качестве битумного связующего в ходе исследований использовались окисленные битумные вяжущие, паспортизируемые как битумы нефтяные дорожные вязкие марки БНД 100/130, соответствующие по ГОСТ 33133-2014 и произведенные на одном из нефтеперерабатывающих заводов в Приволжском федеральном округе (табл. 2).

Таблица 2

Показатели качества исходного битумного вяжущего БНД 100/130

№ п/п	Наименование показателя	Требования ГОСТ 33133-2014	Фактические значения	Метод испытания
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 25 ⁰ С	101-130	109	ГОСТ 33136
2	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при 0 ⁰ С, не менее	30	37	ГОСТ 33136
3	Растяжимость, см, при температуре 25 ⁰ С, не менее	70	97	ГОСТ 33138
4	Растяжимость, см, при температуре 0 ⁰ С, не менее	4,0	6,3	ГОСТ 33138
5	Температура размягчения по кольцу и шару, ⁰ С, не ниже	45	46	ГОСТ 33142
6	Температура хрупкости, ⁰ С, не выше	-20	-21	ГОСТ 33143
7	Температура вспышки, ⁰ С, не ниже	230	257	ГОСТ 33141
8	Изменение массы образца после старения, %, не более	±0.7	0.3	ГОСТ 33140
9	Содержание твердых парафинов, %, не более	3.0	1.7	ГОСТ 33139

Групповой состав исходного битума, определённый по методу S.A.R.A. IP 469/1, показал достаточно высокие значения для асфальтенов (29,632%) и смоляных компонентов (34,552%). Содержание ароматических и насыщенных углеводородов составляло 21,241% и 14,575% соответственно. При этом суммарное количество мальтеновых компонентов (масляных и низкомолекулярных смоляных фракций) достаточно для образования устойчивой дисперсионной среды.

Содержание бутадиен-стирольного термоэластопласта и синдиотактического 1.2 полибутадиена в исследуемых композициях варьировалось от 0,5 до 5 масс. %, что соответствовало ранее отработанной методике проведения испытаний [11]. Учитывая значительное количество мальтенов в составе исходного битума, в применении пластифицирующих компонентов в составе ПБВ необходимости не было.

Изготовление полимерно-битумных смесей для проведения исследований проводилось в следующей последовательности: полимерные компоненты порциями вводили в исходный битум в течение 15-20 минут с помощью лабораторного высокоскоростного диспергатора с высоким усилием сдвига (600-1000 об/мин). Эти условия позволяют обеспечить необходимый уровень механического измельчения полимера и распределения эластичных частиц полимеров по всему объёму битумной смеси. Далее, при постоянном механическом перемешивании (лопастная мешалка, 500 об/мин), проводилось дозревание полимерно-битумной смеси и за 2-2,5 часа полимерные частицы полностью разворачивались и набухали, что наблюдалось в увеличении вязкости системы. Количественные показатели полученных смесевых композиций оценивали в соответствии с требованиями действующих национальных стандартов.

3. Результаты и обсуждение

Полученные в ходе исследований данные подтвердили известный факт о способности СБС-полимеров поглощать мальтеновые фракции из состава исходного битума и увеличиваться в объеме в 7-9 раз, активно влияя на вязкостные характеристики смесевой композиции [6, 17]. Образующаяся в результате трехмерная эластичная структура агрегируется с асфальтеновым каркасом вяжущего и повышает его способность к восприятию силовых и ударных нагрузок.

Общеизвестно, что ПБВ на БС ТЭП отличаются высокой вероятностью расслаивания при статическом режиме хранения и транспортировки. Важно отметить способность синдиотактического 1,2-полибутадиена обеспечивать стабильность

вяжущего от расслоения за счет вовлечения в перекрёстное взаимодействие достаточно большого числа ненасыщенных связей $>C=C<$ 1,2 СПБ и асфальтовых агломератов. Кристаллитные области синдиотактического 1,2-полибутадиена, как под действием температурных параметров, так и при механическом воздействии, способны переходить в вязкотекучее состояние [13]. Указанное обстоятельство препятствует использованию 1,2 СПБ в качестве единственного модификатора с целью получения полимерно-битумных вяжущих, соответствующих требованиям ГОСТ Р 52056-2003.

Динамика изменения основных свойств битума, модифицированного отдельно каждым термоэластопластом в количестве от 0 до 5 масс. %, представлена на рис. 3

Очевидно, что с ростом количества распределенного в объеме битумного вяжущего полимерных агломератов, способных к набуханию и растворению, глубина проникания иглы при фиксированной температуре испытаний уменьшится (рис. 3).

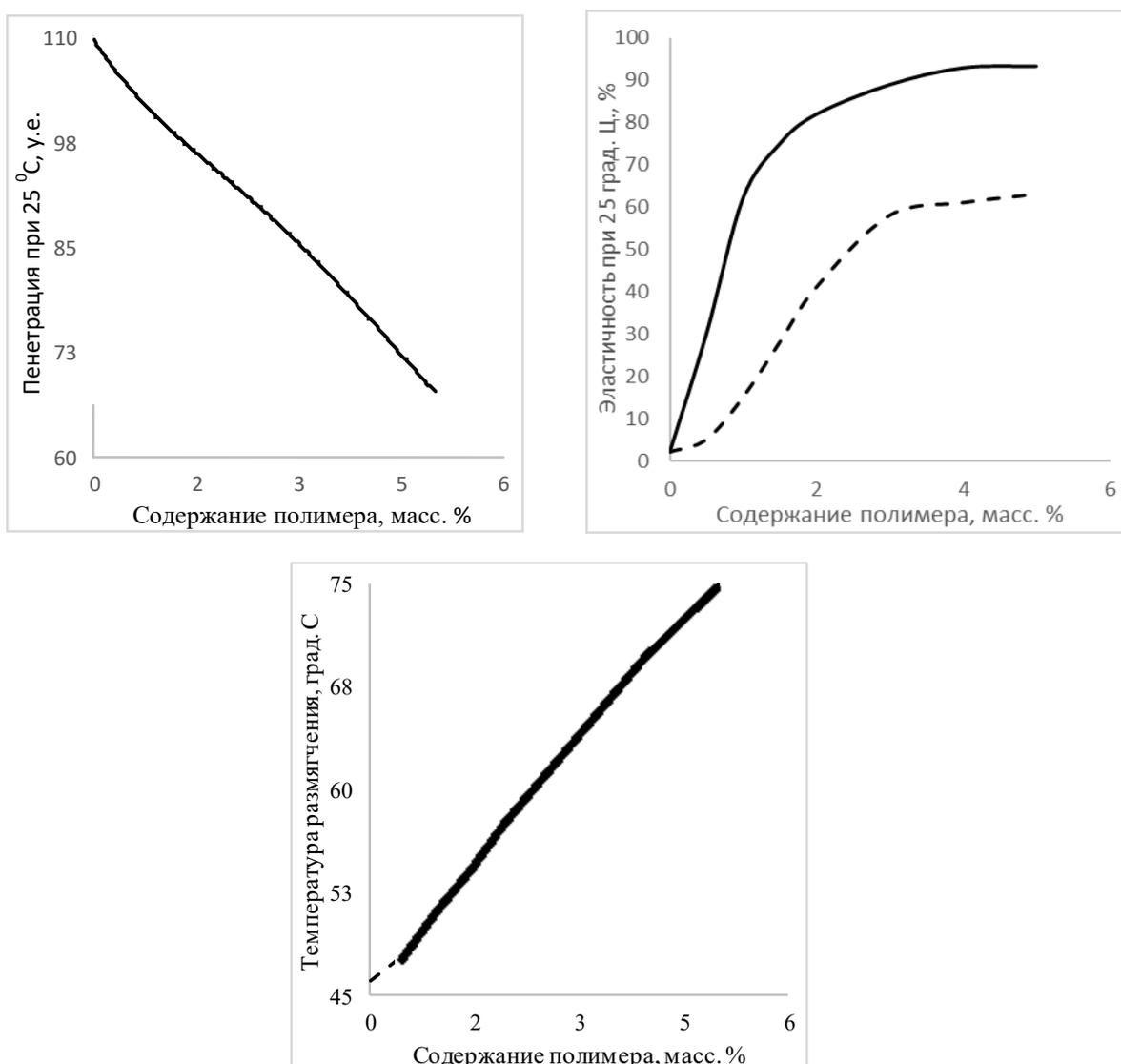


Рис. 3. Физико-механические показатели смеси на основе БС ТЭП (сплошная линия) и 1,2 СПБ (штриховая линия) в зависимости от содержания полимера (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Physico-mechanical parameters of the mixture based on SBS (solid line) and 1,2 SPB (dashed line) depending on the polymer content (illustration by the authors)

Теплофизические показатели, к которым относится и температура размягчения исследуемой смеси битума и полимера, во многом определяются величиной молекулярной массы полимера, поэтому, при увеличении в составе смеси содержания

полимера с высоким значением температуры размягчения, увеличивается и степень его влияния на указанные показатели. Этим объясняется больше влияние на температуру размягчения смеси именно SBS-330L, характеризующегося высокой молекулярной массой. Можно отметить, что при введении 1,2 СПБ в исходный битум в количестве 5 % температура размягчения вяжущего возрастает по сравнению с исходным битумом в 1.6 раза, а для SBS-330L увеличение составляет 1,75 раза.

Одним из возможных путей снижения температуры хрупкости полимерно-битумных композиций является введение в их состав низкомолекулярных углеводородов, оказывающих на битумы пластифицирующее действие [18, 19]. В данном случае, не смотря на высокое содержание мальтенов в исходном битуме, требуемой эластичности, соответствующей ГОСТ Р 52056-2003, с использованием исключительно синдиотактического 1,2-полибутадиена в исследованном диапазоне концентраций достигнуто не было.

4. Заключение

1. Оценка качественных показателей исходного битума нефтяного дорожного вязкого БНД 100/130 на соответствие требованиям ГОСТ 33133-2014 показала, что, не смотря на выполнение нормированных показателей, битумы окисленные дорожные вязкие, без дополнительной модификации, не в состоянии обеспечить весь комплекс свойств на всей территории Российской Федерации.

2. Для природно-климатических условий России и качественных показателей крупнотоннажно производимых в стране окисленных нефтяных дорожных битумов оптимальным полимерным модификатором на протяжении последних 65 лет остаются бутадиен-стирольные термоэластопласты. Показано, что использование СБС-полимеров даже в достаточно небольших концентрациях способно обеспечить полный комплекс свойств, регламентированных ГОСТ Р 52056-2003 и гарантировать подбор оптимального состава вяжущих для всех регионов Российской Федерации.

3. Установлено что повышенная растворимость 1,2-СПБ в сложных многокомпонентных нефтепродуктах, является определённым преимуществом по сравнению с блоксополимером SBS-330L. При этом 1,2-полидиены в исходном битуме достаточно хорошо растворяются (а не набухают, подобно полимеру SBS-330L). Продолжительность их растворения при 160°C не превышает двух часов. Это способствует понижению вязкости битумно-полимерной смеси, а, следовательно, улучшает укрываемость каменных материалов в ходе процесса смешения на АБЗ, что в итоге приведет к сокращению времени на смешение и к снижению энергетических затрат.

4. Показано, что уровень качественных и количественных показатели от полимерно-битумных вяжущих на основе БС ТЭП производимых на АО «Воронежский завод синтетического каучука» и ПАО «Нижекамскнефтехим».

Целесообразно продолжить исследования в области смесевых композиций на основе термоэластопластов различного состава с целью оптимизации показателей ПБВ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке и научном сопровождении кафедры Химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева «МИРЭА-Российский технологический университет» (г. Москва).

Список литературы / References

1. Гохман Л.М. Дорожный полимерасфальтобетон. М: Экон-Информ, 2017. 480 с. [Gokhman L.M. Road polymerasphalt concrete. M: Econ-Inform, 2017. 480 p.]
2. Пискунов И. В., Харпаев А. В., Башкирцева Н. Ю., Рожков И.М. Основные тенденции в производстве и применении битумных материалов / Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт, 2021. № 11, С. 3-16 [Piskunov I. V., Harpaev A.V., Bashkirtseva N. Yu., Rozhkov I.M. The main trends in the production and application of bitumen materials / Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices, 2021. No. 11, P. 3-16]

3. Симчук Е.Н., Харпаев А. В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях / Дороги и мосты, 2023. вып. 48, С. 274-305 [Simchuk E.N., Kharpaev A.V., Rozhkov I.M. Modern approaches to modeling the aging of bitumen binders in laboratory conditions / Roads and Bridges, 2023. Iss. 48, P. 274-305].
4. Саламанова М.Ш., Муртазаев С-А.Ю., Батаев Д.К-С., Аласханов А.Х. Теоретические основы совместимости многокомпонентных наполненных вяжущих систем / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020, № 47 (1), С.165-173. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-165-173 [Salamanova M.Sh., Murtazaev S-A.Yu., Bataev D.K-S., Albaskhanov A.H. Theoretical foundations of compatibility of multicomponent filled knitting systems / Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. 2020, No. 47 (1), P.165-173. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-165-173]
5. Ширяев А.О., Обухов А.Г., Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю. Полимерные модификаторы битумных вяжущих / Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2017. №11. С. 48-54 [Shiryayev A.O., Obukhov A.G., Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu. Polymer modifiers of bitumen binders / Bulletin of BGTU named after V. G. Shukhov. 2017. No.11. P. 48-54]
6. Kashevskaya E.V., Boksha M.Yu., Isakov A.M., Nebratenko D.Yu. Závislosti vlivu struktury polymerů SBS na vlastnosti polofoukaných a oxidovaných asfaltových pojiv. Zkoušení materiálů a konstrukcí vozovek. ASFALTOVÉ VOZOVKY, 2021, P.2-3
7. Nebratenko D.Yu., Boksha M. Yu., Isakov A. M. Influence of SBS polymers of various structure on the properties of semi-blown bitumen binders / Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 21 (2022), P. 5 – 17 DOI: 10.7409/rabdim.022.001
8. Nizhnekamskneftekhim. Styrene-butadiene block-copolymer (SBS) grade SBS-330. TY 20.17.10-214-05766801-2020 <https://www.nknh.ru/en/products/rubbers/tpc/blok-sopolimer-stirol-butadien-stirolnyu-sbs/>
9. Махиянов Н. Структурный состав бутадиен-стирольных сополимеров по данным спектроскопии ЯМР: резонанс на ядрах ^1H и ^{13}C / Журнал прикладной химии, 2021, Т. 94, № 1, стр. 72-80 DOI: 10.31857/S0044461821010102 [Makhiyanov N. Structural composition of styrene-butadiene copolymers according to NMR spectroscopy data: resonance on ^1H and ^{13}C nuclei / Journal of Applied Chemistry, 2021, Vol. 94, No. 1, P. 72-80 DOI: 10.31857/S0044461821010102]
10. Technical brochure JSR Elastomer Products Div. Specialty Elastomer Dept. 2020, 12 p.
11. Небрятенко Д.Ю., Лушников Н.А. Полимерные модификаторы битума: бутадиен-стирольный термоэластопласт и синдиотактический полибутадиен / Вестник ВСГУТУ. 2022. № 2 (85), С. 78-86 DOI 10.53980/24131997_2022_2_78 [Nebratenko D.Yu., Lushnikov N.A. Polymer bitumen modifiers: styrene-butadiene thermoplastics and syndiotactic polybutadiene / Bulletin of VSGUTU. 2022. No. 2 (85), P. 78-86 DOI 10.53980/24131997_2022_2_78]
12. Чалых А.Е., Тимофеева В.Ф., Рябчикова Г.Г., Матвеев В.В., Алиев А.Д. Диффузия низкомолекулярных веществ в привитые бутадиен-стирольные блок-сополимеры и их структура / Высокомолекулярные соединения. 1986. Т. 27. №11. С. 2297-2302 [Chalykh A.E., Timofeeva V.F., Ryabchikova G.G., Matveev V.V., Aliev A.D. Diffusion of low molecular weight substances in grafted butadiene-styrene block copolymers and their structure / High Molecular Compounds. 1986. Vol. 27. №11. P. 2297-2302].
13. Термоэластопласты / Под ред. В. В. Моисеева. М.: Химия, 1985. 184 с. [Thermoplastic elastomers / Ed. by V. V. Moiseev. M.: Chemistry, 1985. 184 p.].
14. Пат. РФ 2177008 С08F136/06. Бырихина Н. Н., Аксенов В. И., Кузнецов Е. И. Способ получения синдиотактического 1,2-полибутадиена. / Оpubл. 20.12.2001 [Patent of Russian Federation 2177008 С08F136/06. Byrikhina N. N., Aksenov V. I., Kuznetsov E. I. Method of preparation of syndiotactic 1,2-polybutadiene. //Publ. 20.12.2001].
15. Абдуллин М. И., Глазырин А. Б., Куковинец О. С., Басыров А. А., Муслухов Р. Р. Химическая модификация синдиотактического 1,2-полибутадиена / Известия

- ВУЗов. Химия и химическая технология. 2012. №5. С. 71-78 [Abdullin M. I., Glazyrin A. B., Kukovinets O. S., Basyrov A. A., Muslukhov R. R. Chemical modification of syndiotactic 1,2-polybutadiene / Izvestiya VUZov. Chemistry and chemical technology. 2012. No.5. P. 71-78]
16. Паспорт безопасности / Material Safety Data Sheet (MSDS) № RB830I - E06 на JSR RB 830 («Japan Synthetic Rubber Co.») [Material Safety Data Sheet (MSDS) № RB830I - E06 на JSR RB 830 («Japan Synthetic Rubber Co.»)].
 17. Гохман Л.М. Исследование свойств компонентов дорожного битума / Автомобильные дороги, 2018, №4. С. 94-101 [Gokhman L.M. Investigation of the properties of road bitumen components / Highways, 2018, No. 4. P. 94-101].
 18. Брызгалов Н. И., Кемалов А. Ф. Особенности системы объемного проектирования асфальтобетонной смеси по технологии SUPERPAVE и определение марки PG битумного вяжущего / Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2(90). С. 278-290. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-2-278-290 [Bryzgalov N. I., Kemalov A. F. Features of the system of volumetric design of asphalt concrete mixture using SUPERPAVE technology and determination of the PG grade of bitumen binder / Bulletin of SibADI. 2023. Vol. 20, No. 2(90). P. 278-290. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-2-278-290]
 19. Fomin A., Khomyakov, A. Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method / Construction of Unique Buildings and Structures, 2022. 105Article No 10512. DOI: 10.4123/CUBS.105.12

Информация об авторах

Высоцкий Максим Михайлович, инженер 1 категории, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: vysotskiy.max@yandex.ru

Рыбина Арина Сергеевна, инженер, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: rybina-arina@mail.ru

Савицкий Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: saviktor777@gmail.com

Небрatenко Дмитрий Юрьевич, кандидат химических наук, доцент, Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

E-mail: nebratenko@mail.ru

Information about the authors

Maxim M. Vysotsky, engineer of the 1st category, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

E-mail: vysotskiy.max@yandex.ru

Arina S. Rybina, engineer, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

E-mail: rybina-arina@mail.ru

Valery V. Savitsky, candidate of technical sciences, associate professor, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

E-mail: saviktor777@gmail.com

Dmitry Yu. Nebratenko, candidate of chemical sciences, associate professor, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

E-mail: nebratenko@mail.ru

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3
EDN: EYZUTY



Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1: Влияние изменения модуля упругости адгезива на напряженно-деформированное состояние железобетонной балки

А. Р. Шакиров¹, А. М. Сулейманов^{1,2}, И. А. Старовойтова³

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

³ООО «НПФ «РЕКОН», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Наиболее подверженным к воздействию эксплуатационных факторов компонентом систем внешнего армирования является эпоксидный адгезив. Целью данной работы является изучение влияния изменения модуля упругости эпоксидного адгезива на ползучесть усиленной конструкции. Задачами исследования являются: разработка составов эпоксидных адгезивов с регулируемым модулем упругости, проведение испытаний на прочность и ползучесть.

Результаты. В работе представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной системой внешнего армирования. По результатам исследования выявлено, что снижение модуля упругости адгезива приводит к увеличению деформативности и снижает прочность усиленных балок.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении зависимости напряженно-деформированного состояния от физико-механических характеристик адгезивов, применяемых при усилении строительных конструкций. Данные результаты можно применять при разработке адгезивов с заданными характеристиками под определенные эксплуатационные условия.

Ключевые слова: внешнее армирование, долговечность, усиление, углепластик, эпоксидный адгезив

Для цитирования: Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1: Влияние изменения модуля упругости адгезива на напряженно-деформированное состояние железобетонной балки // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 23-31, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3, EDN: EYZUTY

The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 1: The effect of changes in the modulus of elasticity on the stress-strain state of a concrete beam reinforced with an external reinforcement system

A. R. Shakirov¹, A.M. Sulejmanov^{1,2}, I. A. Starovoitova³

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

³SPC RECON LLC, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The component of external reinforcement systems that is most susceptible to the effects of operational factors is epoxy adhesive. The purpose of this work is to study the effect of changes in the elastic modulus of an epoxy adhesive on the creep of a reinforced structure. *The objectives of the study are:* the development of compositions of epoxy adhesives having regulated elastic modulus, conducting strength and creep tests.

Results. The paper presents the results of stress-strain state studies of reinforced concrete beams reinforced with piles. According to the results of the study, it was revealed that a decrease in the elastic modulus of the adhesive leads to an increase in deformability and reduces the strength of reinforced beams.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in establishing the dependence of the stress-strain state on the physical and mechanical characteristics of adhesives used in strengthening building structures. These results can be used in the development of adhesives with specified characteristics for certain operating conditions.

Keywords: external reinforcement, durability, reinforcement, carbon fiber, epoxy adhesive

For citation: Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 1: The effect of changes in the modulus of elasticity on the stress-strain state of a concrete beam reinforced with an external reinforcement system // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 23-31, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3, EDN: EYZUTY

1. Введение

Системы внешнего армирования (СВА) железобетонных конструкций представляю сложную систему, состоящую из железобетонной подложки, эпоксидного адгезива и углеродной ткани. При условном разделении работы каждого элемента СВА, можно предположить, что самым чувствительным элементом к длительному воздействию эксплуатационных факторов является полимерный адгезив, который работая под воздействием касательных напряжений между усиливающим элементом и бетонной подложкой, при совместном воздействии климатических факторов, обеспечивает совместную работу всей системы. При этом в адгезиве реализуется режим ползучести [1, 2].

В области СВА строительных конструкций углеродными композитами существует множество научных трудов [3-5], посвященных изучению их долговечности. Так, например, Карим Бензarti в своих трудах [6-8] изучил влияние ускоренных испытаний на долговечность СВА. К. М. Дальфре [9] провела исследование влияния на разрушение композитных систем усиления атмосферных воздействий, а в работах [10-11] приводятся результаты исследования в суровых климатических условиях. Авторы работы [12] провели испытание на старение эпоксидного адгезива и углеродного ламината методом ускоренных испытаний и натурными испытаниями. По результатам данного исследования отмечается деградация свойств адгезива, а изменение свойств углекомпозиата оказалось незначительным. В работе [13] авторами выявлен переход от

когезионного разрушения к адгезионному после воздействия температурных циклов на образцы, погруженных в воду. Так же отмечается изменение модуля упругости адгезива при данном характере воздействий.

В работах Селивановой Е. О. [1, 2] изучено развитие ползучести, отмечается необходимость учета вязкоупругих деформаций для усиленных конструкций при действии больших постоянных нагрузок. В работе [14] экспериментально подтверждается влияние температурно-силовых факторов на НДС железобетонных конструкций, усиленных СВА.

Из результатов данных исследований можно сделать вывод, что наиболее подверженным воздействию эксплуатационных факторов компонентом систем внешнего армирования является эпоксидный адгезив. Таким образом, при изучении долговечности конструкций, усиленных системами внешнего армирования с применением углеродных волокон, целесообразно уделить внимание долговечности эпоксидных адгезивов.

Цель исследования: изучение зависимости напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной СВА, при изменении модуля упругости эпоксидного адгезива.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать составы эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
2. Провести экспериментальное исследование прочности железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
3. Провести экспериментальное исследование на ползучесть методом ступенчатых изотерм железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.

В данной работе было изучено влияние изменения модуля упругости эпоксидного адгезива на НДС железобетонной балки, усиленной СВА.

2. Материалы и методы

Приготовление составов эпоксидных адгезивов

В исследованиях были использованы двухкомпонентные клеевые связующие на основе эпоксидных смол и смесевых отвердителей аминного типа РекАРМ-Б [15- 17].

Основа адгезива (компонент А) включала эпоксидную смолу на основе бисфенола А с эпоксидным эквивалентом $EEW = 210-215$ г/экв., монофункциональный эпоксидный активный разбавитель, пластификатор и реологическую добавку. Отвердитель (компонент Б) состоял из смеси алифатических и ароматических аминов в соотношении $\sim 1:1$.

Для изменения упруго-прочностных характеристик клеевого связующего в данной работе варьировалось содержание пластифицирующей добавки (дибутилфталата) в основе клея – от 5 до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы (таблица 1).

Таблица 1

Составы клеевых связующих

Компоненты состава и их показатели	Значение для состава:		
	РекАРМ-D5	РекАРМ-D10	РекАРМ-D30
Эпоксидная смола с целевыми добавками	100 масс. ч.	100 масс. ч.	100 масс. ч.
Количество пластификатора на 100 масс. ч. смолы	5 масс. ч.	10 масс. ч.	30 масс. ч.
EEW основы клеевого связующего	224,8 г/экв.	235,5 г/экв.	278,4 г/экв.
HEW смесевого отвердителя	60,9 г/экв.		
Соотношение компонентов А:Б	100:27,1	100:25,89	100:21,9

Приготовление образцов и проведение испытаний

Подготовка клеевых связующих для проведения испытаний включала: смешение компонентов клея, заливку его в формы и отверждение. Отвердитель вводили в основу клеевого связующего при постоянном перемешивании, после добавления отвердителя смешение компонентов осуществляли в течение 2 мин при температуре $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. Для определения физико-механических характеристик (прочности и модуля упругости при растяжении) были изготовлены образцы-лопатки, размеры которых представлены на рис.1. Смесь компонентов клеевого связующего заливали в металлические формы через 5-10 мин после смешения компонентов и выдерживали в течение 7 суток при температуре $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. По истечению 7 суток проводили термообработку образцов при температуре 60°C в течение 120 минут.

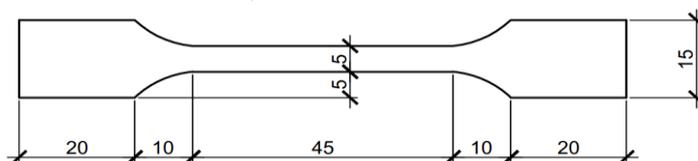


Рис. 1. Размеры образцов лопаток (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Dimensions of the blade samples (illustration by the authors)

Испытания проводились на растяжение на универсальной испытательной машине ИР 5082 со скоростью 1 мм/мин. Деформации снимались с помощью экстензометра ИДН 10/25. Температуру стеклования определяли при помощи установки динамического механического анализа (ДМА) PerkinElmer DMA 8000.

Для проведения испытаний на железобетонных балках были изготовлены опытные образцы балки из бетона класса В15 с сечением 120×140 (h) мм, общей длиной $L=1000$ мм. Армирование балок выполнено в нижней зоне двумя стержнями $\varnothing 8$ А400 длиной 1000.

Балки в продольном направлении усиливались одним слоем углеродной ленты FibArm Tape 230 шириной 120 мм при этом продольные холсты не доводились до опор на расстояние 50 мм. Для пропитки и приклеивания углеродных лент к бетону применялись эпоксидные составы РекАРМ-D5, РекАРМ-D10 и РекАРМ-D30 (табл. 1) с различным содержанием пластифицирующей добавки. С применением каждого состава клеевого связующего было усилено по две балки. В дальнейшем на одной из балок были проведены кратковременные испытания, на другой – испытания на ползучесть методом ступенчатых изотерм.

Определение кратковременной прочности производилось на лабораторном стенде на четырёхточечный изгиб (рисунок 2). Нагружение проводилось при помощи гидравлического домкрата с насосной станцией. Для измерения прогибов в середине пролета установили индикатор часового типа. Нагрузку измеряли при помощи манометра.



Рис. 2. Проведение испытаний на балках (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Testing on beams (illustration by the authors)

Определение ползучести железобетонных балок, усиленных СВА, методом ступенчатых изотерм проводилось по методике, предложенной в работах [14, 15]. Испытания на ползучесть проводились под нагрузкой 70% от разрушающей.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний на растяжение образцов-лопаток получены значения прочности и модуля упругости при растяжении эпоксидных адгезивов. При введении пластификатора от 5 до 10 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы увеличивается прочность адгезива при растяжении и незначительно снижается модуль упругости, температура стеклования не изменяется. Увеличение пластификатора до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы приводит к резкому снижению прочности при растяжении и модуля упругости (в 2-3 раза) и уменьшению температуры стеклования до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что существенно ограничивает возможности использования такого связующего в реальной практике.

Такая же противоположная зависимость изменения модуля упругости и прочности на растяжение эпоксидных адгезивов наблюдается в работах и других авторов. Например, в работе [18] наблюдается снижение прочности на растяжение с увеличением содержания углеродных нанотрубок, а модуль упругости при этом наоборот увеличивается. Характеристики составов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики составов

Эпоксидные составы	РекАРМ-D5	РекАРМ-D10	РекАРМ-D30
Прочность при растяжении	38-44 МПа	45-50 МПа	17-18 МПа
Модуль упругости при растяжении	6,04 ГПа	5,5 ГПа	2-3 ГПа
Температура стеклования	51 $^{\circ}\text{C}$	52 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$

Испытания железобетонных балок, усиленных СВА, при кратковременном нагружении показывают, что развитие прогибов балки с адгезивами РекАРМ-D5 и РекАРМ-D10 происходит одинаково до нагрузки 2200 кгс (рис. 3). Далее у балки с адгезивом РекАРМ-D5 наблюдается резкое снижение развития деформаций до момента разрушения при нагрузке 3108 кгс. Балка с адгезивом РекАРМ-D10 разрушается при нагрузке 3324 кгс. У балки с адгезивом РекАРМ-D30 значения прогибов заметно больше, чем у предыдущих образцов. Однако предельная нагрузка для этой балки выше – 3541 кгс.

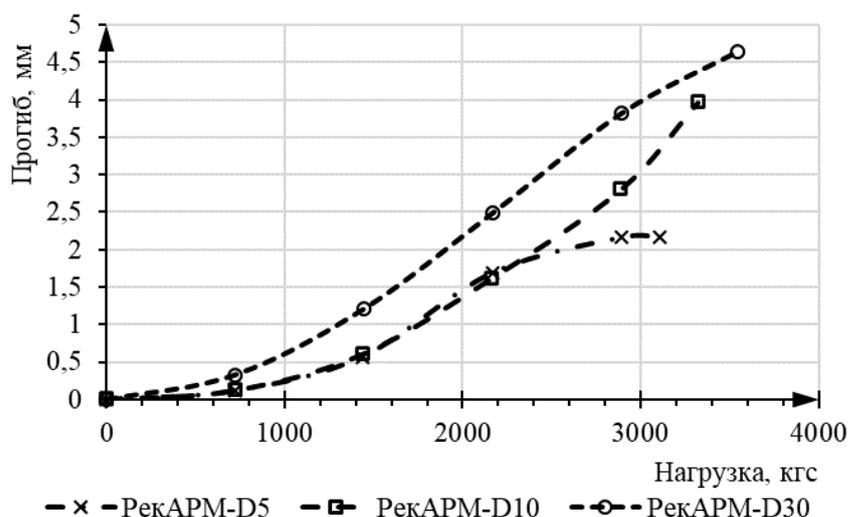


Рис. 3. График зависимости прогибов балки от нагрузки (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Graph of the dependence of beam deflections on load (illustration by the authors)

Далее балки испытывались в режиме ползучести под постоянной нагрузкой равной 70% от разрушающей для каждого образца с соответствующим адгезивом. Температура испытаний повышалась ступенчато на 5°C. Начальная температура составила 25°C. Каждая температура выдерживалась в течение 60 минут.

На рисунке 4 представлены ступенчатые изотермические кривые ползучести балок. Балка, усиленная адгезивом РекАРМ-D5, разрушилась при температуре 60°C, с адгезивом РекАРМ-D10 разрушение произошло при температуре 55°C. Из-за низкой температуры стеклования балка, усиленная с адгезивом РекАРМ-D30, разрушилась при температуре 35°C.

По полученным ступенчатым кривым ползучести построены обобщенные кривые прогноза ползучести железобетонной балки (рисунок 5). Ползучесть балок, усиленных адгезивами РекАРМ-D-5 и РекАРМ-D10, на начальном отрезке развивается практически одинаково. Далее, с течением времени, у балки с адгезивом РекАРМ-D10 происходит ускорение процесса ползучести. Ползучесть балки, усиленной при помощи адгезива РекАРМ-D30, протекает с большей скоростью, чем с адгезивами РекАРМ-D5 и РекАРМ-D10.

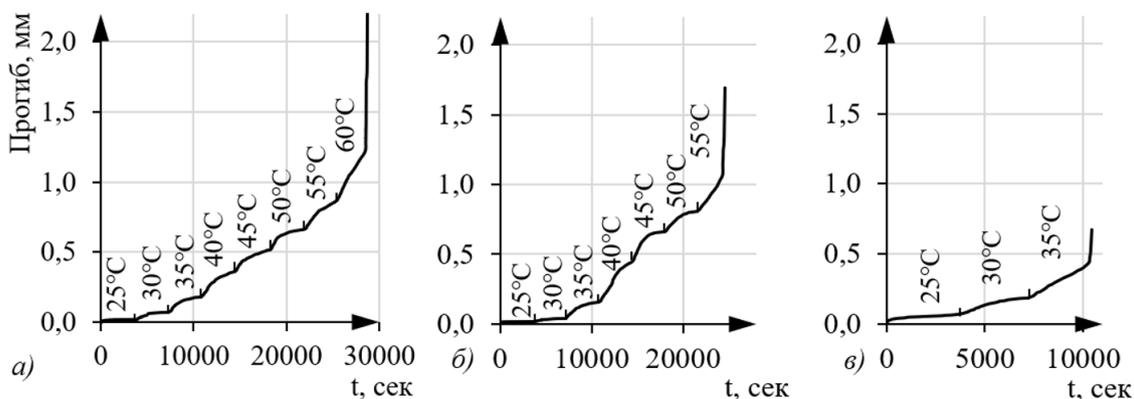


Рис. 4. Графики ступенчатых изотермических кривых ползучести: а) балка с адгезивом РекАРМ-D5; б) балка с адгезивом РекАРМ-D10; в) балка с адгезивом РекАРМ-D30 (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Graphs of stepwise isothermal creep curves: a) beam with RecARM-D5 adhesive; b) beam with RecARM-D10 adhesive; c) beam with RecARM-D30 adhesive (illustration by the authors)

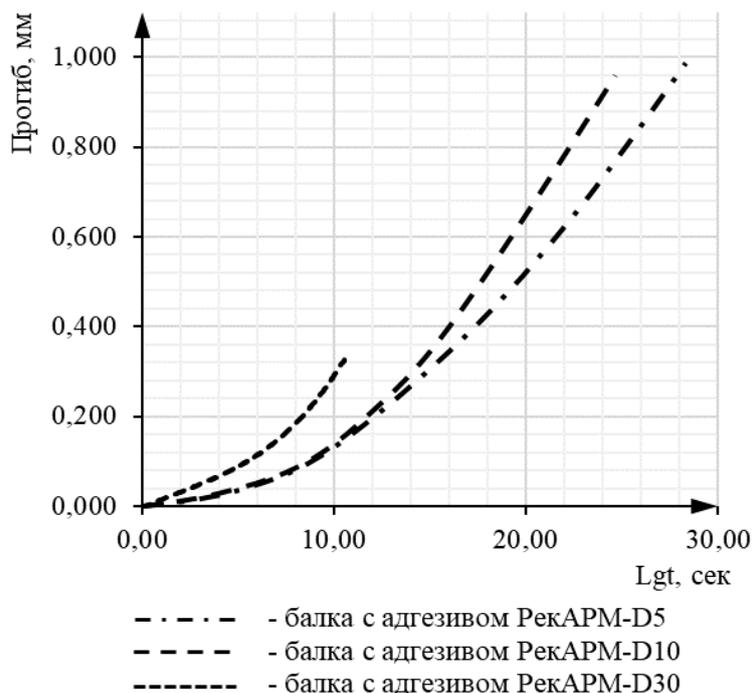


Рис. 5. Графики обобщенных кривых прогноза ползучести (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Graphs of generalized creep prediction curves (illustration by the authors)

4. Заключение

Разработаны составы эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.

Экспериментальное исследование прочности железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости, показало снижение несущей способности.

При исследовании на ползучесть методом ступенчатых изотерм на железобетонных балках, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости, выявлено влияние данного параметра на долговечность.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований выявлена зависимость НДС железобетонной балки, усиленной СВА, от характеристик эпоксидных адгезивов. Снижение модуля упругости адгезива приводит к увеличению деформативности железобетонной балки, усиленной СВА.

Список литературы/ References

1. Селиванова, Е. О., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования ползучести в композиционных материалах, усиливающих изгибаемые железобетонные элементы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 2 (33). – С. 95-99. [Selivanova, E. O., Smerdov D. N. Experimental study of creep in composite materials, bending reinforcement concrete elements // Academic journal Uralniiproekt RAASN. – 2017. – № 2 (33). - P. 95-99.]
2. Селиванова, Е. О., Смердов Д.Н. Исследования свойств ползучести в элементах систем внешнего армирования при длительном воздействии нагрузки // Политранспортные системы: материалы IX Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года. – Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 53-56. [Selivanova, E. O., Smerdov D. N. Studies of creep properties in elements of external reinforcement systems under prolonged stress // Polytransport systems: proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 17-18, 2016. – Siberian State University of Railway Engineering. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Engineering, 2017. P. 53-56.]
3. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Чесноков Г. В., Михалдыкин Е. С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал “НАУКОВЕДЕНИЕ”. – 2016. – Vol. 8. – № 3. [Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. Analysis of experimental studies on strengthening of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading // Online journal “NAUKOVEDENIE”. – 2016. – Vol. 8. – № 3.]
4. Леонова, А. Н., Софьяников О.Д., Скрипкина И.А. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии агрессивной среды // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 4. – С. 496-509. [Leonova, A. N., Sofyanikov O. D., Skripkina I. A. Features of reinforcement of metal structures with composite materials under the influence of aggressive environment // Bulletin of MGSU. – 2020. – Vol. 15. – No 4. – P. 496-509.]
5. Денисова, А. Д., Кужман Е. Д., Шеховцов А. С. Влияние температуры на работу композиционного материала, применяемого при усилении железобетонных конструкций, при растяжении // Жилищное строительство. – 2023. – № 5. – С. 46-53. [Denisova, A.D., Kuzhman E. D., Shekhovtsov A. S. The influence of temperature on the work of a composite material used to strengthen reinforced concrete structures during stretching // Housing construction. – 2023. – No 5. – P. 46-53.]
6. Benzarti K., Chataigner S., Quiertant M. [et al.] Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays // Construction and Building Materials. – 2011. – № 25 (2). – P. 523-538.

7. Benzarti K., Quiertant M., Marty C. Effects of Accelerated Ageing on the Adhesive Bond Between Concrete Specimens and External CFRP Reinforcements // *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*. – Springer, Berlin, Heidelberg., 2011.
8. Quiertant M., Benzarti K., Schneider J. Effects of Ageing on the Bond Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer/Concrete Adhesive Joints: Investigation Using a Modified Double Shear Test // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2017. – № 45 (6).
9. Dalfré G. M., Parsekian G. A., Ferreira D. C. Degradation of the EBR-CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering, *Rev // IBRACON Estrut. Mater.* – 2021. – Vol. 14. – № 2.
10. Nasser Al Nuaimi, Muazzam Ghous Sohail, Rami Hawileh . Durability of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates under Harsh Climatic Conditions // *Journal of Composites for Construction*. – 2021.
11. Vdovin, E. A., Stroganov V. F. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Vol. 786*. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012065. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012065. – EDN CZWWRN.
12. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing // *Materials*. – 2021. – № 14.
13. Liu Shuai, Pan Yunfeng, Li Hedong. Durability of the Bond between CFRP and Concrete Exposed to Thermal Cycles // *Materials*. – 2019. – № 14.
14. Смердов Д. Н. Экспериментальные исследования влияния температурной релаксации и напряжения полимерных композиционных материалов, работающих в составе изгибаемых железобетонных элементов, при длительном воздействии нагрузок // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 150-163. [Smerdov D. N. Experimental studies of the effect of temperature relaxation and stress of polymer composite materials working as part of bent reinforced concrete elements under prolonged exposure to loads // *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building*. – 2022. – Vol. 24. – No 1. – P. 150-163.]
15. Shakirov, A. Sulejmanov A. Prediction of Creep for a Reinforced Concrete Beam Strengthened with an External Reinforcement System Using the Stepped Isothermal Method // *Lecture Notes in Civil Engineering: Proceedings of STCCE 2021. Selected Papers, Switzerland, April, 28, 2021. Vol. 169*. – Switzerland: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG, GEWERBESTRASSE 11, CHAM, SWITZERLAND, CH-6330, 2021. – P. 113-121. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_12. – EDN JAUFFX.
16. Шакиров А. Р., Пичкалев А. А., Сулейманов А. М. Разработка метода оценки ползучести железобетонных балок, усиленных системами внешнего армирования, методом температурно-временной аналогии // *Международная научно-техническая конференция «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XI академических чтений РААСН»*. – Саранск, 2020. – С. 366-374. [Shakirov A. R., Pichkalev A. A., Suleymanov A.M. Development of a method for assessing the creep of reinforced concrete beams strengthened with external reinforcement systems by the method of temperature-time analogy // *International scientific and Technical Conference "Durability, strength and mechanics of destruction of building materials and structures: materials of the XI academic readings of the Russian Academy of Sciences"*. – Saransk, 2020. – P. 366-374.]
17. Бурнашев А. И., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К. Наномодифицированная древесная мука - эффективный наполнитель поливинилхлоридных композиций // *Строительные материалы*. – 2011. – № 9. – С. 72-74. – EDN ONLEDT. [Burnashev A. I., Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K. Nanomodified wood flour is an effective

filler for polyvinyl chloride compositions// Building materials. - 2011. – No. 9. – PP. 72-74. – EDN ONLEDТ.]

18. Кычкин А. А., Кычкин А. К., Туисов А. Г. Влияние углеродных нанотрубок на упруго-прочностные свойства эпоксидного связующего // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 201-207. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. – EDN AOIQRТ. [Kychkin, A., Kychkin, A.K., Tuisov, A.G., Lebedev, M.P. Anan'eva, E.S. (2023). Influence of one-wall carbon nano-tubes on the elastic-strength properties of epoxy binding. Polzunovskiy vestnik, (2), 201-207. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. EDN: AOIQRТ.]

Информация об авторах

Шакиров Алмаз Райнурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alma-94@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Старовойтова Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, ООО «Научно-производственная фирма «Рекон», г. Казань, Россия

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

Information about the authors

Almaz R. Shakirov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: alma-94@mail.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Irina A. Starovoitova, Ph.D. tech. Sciences, Research and Production Company "Rekon" LLC, Kazan, Russia

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4
EDN: FYODOA



Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2: Регулирование прогнозирование модуля упругости

А. Р. Шакиров¹, А. М. Сулейманов¹², И. А. Старовойтова³

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

³ООО «НПФ «РЕКОН», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Как показывают исследования в области систем внешнего армирования изменение модуля упругости адгезивов, применяемых при усилении, имеет влияние на напряженно-деформированное состояние усиленных конструкций. Целью работы является регулирование и прогнозирование изменения модуля упругости эпоксидных адгезивов. Задачами исследования являются: разработка дисперсно-наполненных эпоксидных составов с различными модулями упругости, проведение испытаний на прочность и ползучесть и изучение прогностических моделей для прогнозирования модуля упругости дисперсно-наполненных эпоксидных полимеров.

Результаты. Были разработаны эпоксидные составы с различными модулями упругости и определены их физико-механические характеристики. Проведен анализ моделей для прогнозирования модуля упругости эпоксидных полимеров, выявлена хорошая сходимость аналитических моделей с экспериментальными данными.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении рабочего диапазона для прогностических моделей в зависимости от содержания дисперсного наполнителя. Это позволит предварительно смоделировать физико-механические свойства адгезивов при разработке их с предварительно заданными характеристиками.

Ключевые слова: внешнее армирование, долговечность, усиление, углепластик, эпоксидный адгезив, модуль упругости

Для цитирования: Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2: Регулирование прогнозирование модуля упругости // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.32-40, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4, EDN: FYODOA

The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 2: Regulation and prediction of changes in the elastic modulus of epoxy adhesives depending on the filler content

A. R. Shakirov¹, A.M. Sulejmanov¹², I. A. Starovoitova³

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

³SPC RECON LLC, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* As studies in the field of external reinforcement systems show, a change in the elastic modulus of adhesives used in reinforcement has an effect on the stressed-

strained state of reinforced structures. The purpose of this work is to regulate and predict changes in the elastic modulus of epoxy adhesives. The objectives of the research are: the development of dispersed-filled epoxy compounds with various elasticity modules, conducting strength and creep tests and studying predictive models for predicting the modulus of elasticity of dispersed-filled epoxy polymers.

Results. Epoxy compounds with different elastic modules have been developed and their physical and mechanical characteristics have been determined. The analysis of models for predicting the elastic modulus of epoxy polymers has been carried out, and good convergence of analytical models with experimental data has been revealed.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in identifying the operating range for predictive models depending on the content of the dispersed filler. This will allow you to pre-simulate the physical and mechanical properties of adhesives when developing them with predefined characteristics.

Keywords: external reinforcement, durability, reinforcement, carbon fiber, epoxy adhesive, modulus of elasticity

For citation: Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 2: Regulation and prediction of changes in the elastic modulus of epoxy adhesives depending on the filler content // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.32-40, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4, EDN: FYODOA

1. Введение

На сегодняшний день усиление строительных конструкций системами внешнего армирования (СВА) углеродными композиционными материалами [1-3] является наиболее эффективным способом повышения их несущей способности. СВА активно применяются как в зарубежной строительной практике [4-6], так и в нашей стране [7].

Как показали результаты первой части исследований, изложенных в предыдущей статье, изменение значения модуля упругости эпоксидных адгезивов оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных системой внешнего армирования. Кроме того, методом ступенчатых изотерм удалось выявить и влияние на долговечность усиленных конструкций.

С учетом вышесказанного, при разработке адгезивов для применения в СВА имеет смысл регулирования их модуля упругости с целью повышения их долговечности. Для оптимизации процесса регулирования модуля упругости полимерных композитов удобно применение аналитических моделей [8, 9], позволяющих прогнозировать данный параметр. В научной литературе известны работы, где рассмотрены методы прогнозирования модуля упругости полимерных композитов [10-12]. Так, например, в работах [13-15] приведены исследования по прогнозированию и регулированию модуля упругости полимерных композитов высокомодульными дисперсными наполнителями.

Целью работы является регулирование и прогнозирование изменения модуля упругости эпоксидных адгезивов в зависимости от содержания наполнителя, выявление сходимости аналитических моделей с экспериментальными данными.

Для достижения поставленной задачи решались следующие задачи:

1. Разработка составов эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
2. Определение физико-механических характеристик разработанных составов.
3. Построение моделей для прогноза модулей упругости эпоксидных адгезивов.
4. Сравнение результатов аналитических исследований с экспериментальными данными.

2. Материалы и методы

Приготовление составов эпоксидных адгезивов

В исследованиях были использованы двухкомпонентные клеевые связующие на основе эпоксидных смол РекАРМ-Б [16-18] на эпоксидной основе и смесевом отвердителе из алифатических и ароматических аминов.

Характеристики основы адгезива (компонент А) и отвердителя (компонент Б) описаны в первой части нашей работы.

Для варьирования упруго-прочностных характеристик клеевого связующего было исследовано введение тонкодисперсных наполнителей – кварцевой муки, аэросила и цемента.

В таблице 1 представлены данные по степени наполнения клеевого связующего: в случае введения кварцевой муки и цемента содержание наполнителей изменялось от 25 до 150 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы, в случае аэросила – от 1 до 7,5 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы. Разница в степени наполнения клеевого связующего обусловлена дисперсностью наполнителей – так, в случае портландцемента и кварцевой муки средний размер частиц составляет от 15-20 до 40-50 мкм, в случае аэросила А300 средний размер первичных частиц составляет всего 7 нм.

Таблица 1

Содержание наполнителей

№ п/п	Состав	ν	№ п/п	Состав	ν	№ п/п	Состав	ν
Кварцевая мука			Аэросил			Цемент		
1	M25	0,18	1	A1	0,01	1	Ц25	0,18
2	M50	0,31	2	A2,5	0,02	2	Ц50	0,31
3	M75	0,4	3	A5	0,04	3	Ц75	0,4
4	M100	0,47	4	A7,5	0,06	4	Ц100	0,47
5	M150	0,57				5	Ц150	0,57

Приготовление образцов и проведение испытаний

Подготовка клеевых связующих для проведения испытаний, размеры образцов и режимы отверждения описаны в первой части статьи.

Испытания проводились на растяжение на универсальной испытательной машине ИР 5082 со скоростью 1 мм/мин. Деформации снимались с помощью экстензометра ИДН 10/25 (Рис. 1). Определение прочности на растяжение, модуля упругости проводилось автоматически.



Рис. 1. Проведение испытаний (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Testing (illustration by the authors)

Построение прогностических моделей и обработка результатов испытаний

Для прогнозирования модуля упругости эпоксидных адгезивов в зависимости от объемного содержания наполнителя использовались известные прогностические зависимости. По умолчанию принята формула Эйнштейна [4]:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \left(\frac{5}{2}\right) \vartheta, \quad (1)$$

где E_c - модуль упругости композита, МПа;

E_m - модуль упругости матрицы, МПа;

ϑ - объемное содержание наполнителя;

Также рассмотрены типичные уравнения для расчета модулей упругости полимерных композитов с наполнителями [5]:

- уравнение Кернера:

$$E_c = E_m \frac{E_f A_k + B_k}{E_m A_k + B_k}, \quad (2)$$

$$\text{где } A_k = \frac{\vartheta}{[(7-5\mu)E_m + (8-10\mu_m)E_f]}; B_k = \frac{(1-\vartheta)}{[15(1-\mu_m)]}; \mu_m \approx 0,5$$

E_f - модуль упругости дисперсного наполнителя, принятый для кварцевой муки и аэросила $E_f^{M,A} = 80000$ МПа, для цемента $E_f^{\text{II}} = 18000$ МПа.

- уравнение Гута и Смолвуда:

$$E_c = E_m (1 + 2,5\vartheta + 14,1\vartheta^2), \quad (3)$$

- уравнение Эйлера – Ван Дика:

$$E_c = E_m \left\{ 1 + \frac{1,25\vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{0,74}} \right\}^2, \quad (4)$$

- уравнение Муни:

$$E_c = E_m \exp \frac{1,25\vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{0,74}}, \quad (5)$$

- уравнение Сяо-Халпина:

$$E_c = E_m \frac{1 + A_k B_k \vartheta}{1 - B_k \vartheta}, \quad (6)$$

Как отмечают авторы [5] для эпоксидных композитов, наполненных порошкообразными наполнителями, наиболее точные результаты показывает уравнение Кернера. В то же время в данной модели учитывается не только объемное содержание наполнителя, но и его модуль упругости.

Для удобства расчетов обработка экспериментальных данных и расчет прогностических уравнений выполнялась при помощи системы электронных таблиц MS Excel, а результаты представлены в виде графиков.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний на растяжение были определены модуль упругости и прочность образцов. Усредненные значения экспериментальных данных представлены в таблице 2.

Из графиков на рисунке 3 видно, что с увеличением объемного содержания наполнителя для каждого наполнителя наблюдается плавное снижение прочности на растяжение. При этом, для каждого наполнителя присутствуют свои точки экстремума. При увеличении объемного содержания кварцевой муки (рисунок 2 а) и цемента (рисунок 2 в) до $\nu=0,4$ и $\nu=0,47$ происходит резкое снижение прочности на растяжение, а при $\nu=0,57$ прочность на растяжение резко увеличивается. С увеличением объемного содержания аэросила (рисунок 2 б) до $\nu=0,02$ прочность на растяжение повышается, а при увеличении от $\nu>0,02$ прочность начинает снижаться.

Таблица 2

Усредненные значения экспериментальных данных.

№ п/п	Состав	Объемное содержание наполнителя, ν	Средняя предельная нагрузка $F_{\text{макс}}$ (кН)	Средняя прочность на растяжение $R_{\text{макс}}$ (МПа)	Среднее значение модуля упругости, $E_{\text{ср}}$ (МПа)
1	Исходный состав (матрица)	0	0,64	42,01	2208
2	M25	0,18	0,75	44,91	3258

Окончание таблицы 2

3	M50	0,31	0,63	37,97	3922
4	M75	0,4	0,61	36,17	4318
5	M100	0,47	0,58	37,74	5247
6	M150	0,57	0,57	67,76	1182
7	A1	0,01	0,63	42,49	2062
8	A2,5	0,02	0,73	45,20	2465
9	A5	0,04	0,60	38,44	2344
10	A7,5	0,06	0,59	37,26	2226
11	Ц25	0,18	0,55	39,84	2933
12	Ц50	0,31	0,60	37,86	3697
13	Ц75	0,4	0,43	28,72	3652
14	Ц100	0,47	0,47	30,36	4707
15	Ц150	0,57	0,49	60,54	1222

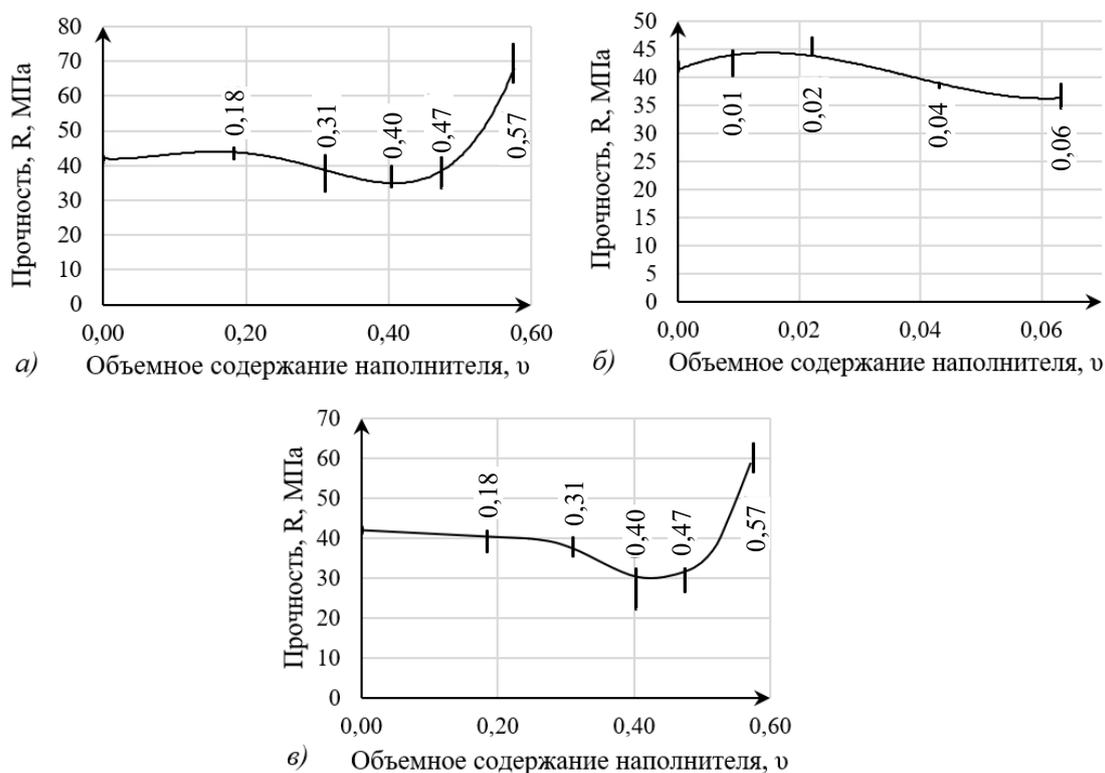


Рис. 2. Изменение прочности от объемного содержания наполнителя:

а) кварцевая мука; б) аэросил; в) цемент (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The change in strength from the volume content of the filler:

a) quartz flour; b) aerosil; c) cement (illustration by the authors)

Введение кварцевой муки и цемента положительно влияет на модуль упругости эпоксидного адгезива (рисунок 3, 4). Однако при объемном содержании данных наполнителей $v=0,57$ наблюдается резкое снижение модуля упругости. Влияние аэросила на модуль упругости в выбранных пределах оказалось не велико (рисунок б). Наблюдается лишь не значительное повышение модуля упругости.

Для наглядности расчетные значения модуля упругости представлены на графиках наложением рядом с экспериментальной кривой. Как видно из графиков (рисунок 4, 5, 6) формула Эйнштейна позволяет адекватно моделировать модуль

упругости эпоксидного адгезива в зависимости от объемного содержания наполнителя. При этом данное линейное уравнение не может отражать точки экстремума. Таким образом, резкое снижение модуля упругости уравнением Эйнштейна не описывается. Следует отметить, что данное уравнение не учитывает модуль упругости самого наполнителя и кривая прогноза будет одинаковой для любых видов наполнителей при их одинаковых объемных долях в эпоксидном адгезиве.

Особый интерес вызывает прогностическая модель, описанная уравнением Кернера, так как включает в себя и модуль упругости наполнителя. При довольно малом объемном содержании наполнителя (для аэросила, рисунок 5) модели Эйнштейна и Кернера практически совпадают. Для больших долей наполнителей (кварцевая мука и цемент, рисунки 3 и 4) две прогностические модели отличаются. Уравнение Кернера для эпоксидного адгезива, наполненного кварцевой мукой, сходится только при $\nu=0,18$. С увеличением объемного содержания кварцевой муки более $\nu>0,18$ прогностическая кривая начинает отклоняться от экспериментальных значений в большую сторону. В случаи наполнения эпоксидного адгезива цементом уравнение Кернера дает хорошую сходимость.

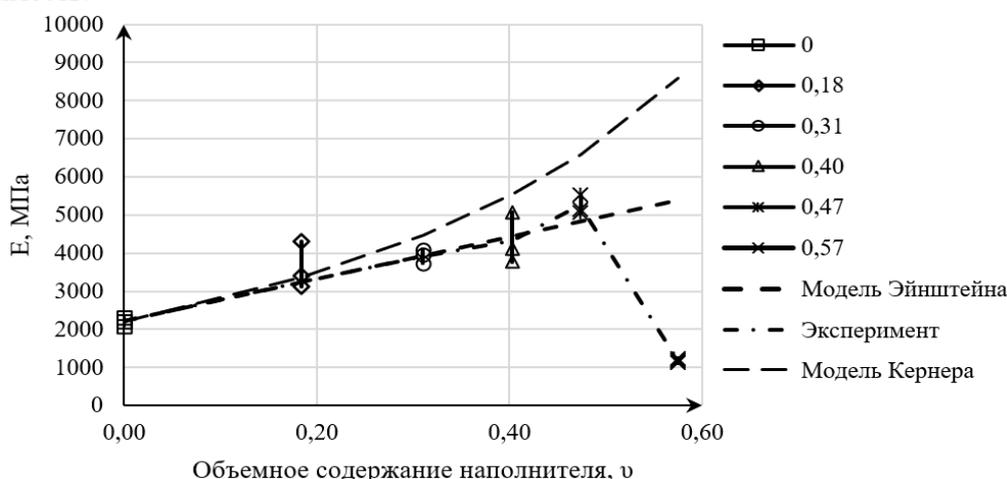


Рис. 3. Влияние объемного содержания кварцевой муки на модуль упругости (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. The influence of the bulk content of quartz flour on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

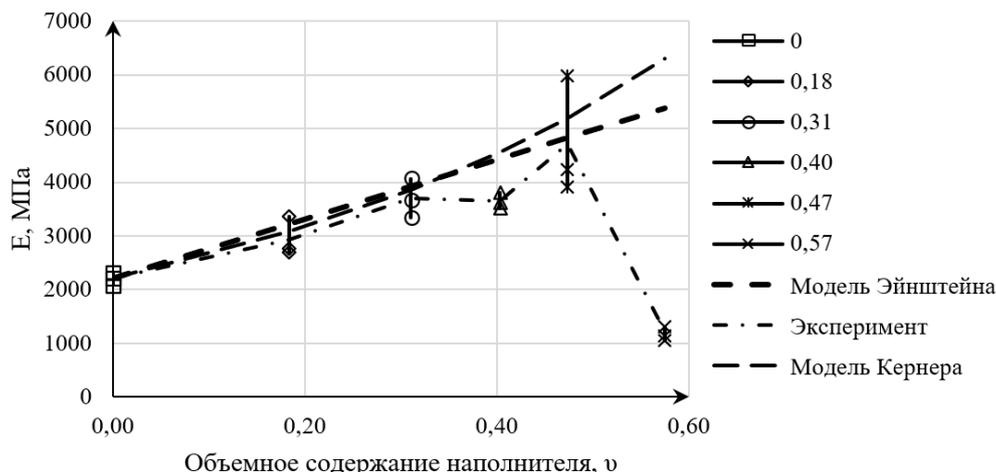


Рис. 4. Влияние объемного содержания цемента на модуль упругости (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. The influence of the volume content of cement on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

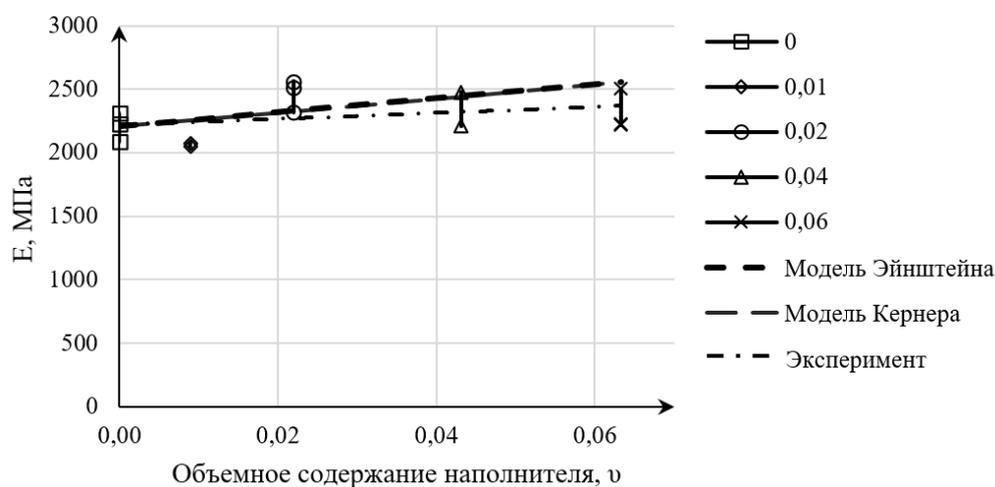


Рис. 5. Влияние объемного содержания аэросила на модуль упругости (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of the volume content of aerosil on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

4. Заключение

1. Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что введение в состав таких порошкообразных наполнителей как кварцевая мука, цемент и аэросил позволяет повышать модуль упругости эпоксидных адгезивов. Однако при этом снижаются прочностные характеристики.

2. Существующие зависимости для прогнозирования модуля упругости в зависимости от объемного содержания выбранных наполнителей позволяют предварительно подобрать оптимальное соотношение компонентов для адгезива. При этом наиболее целесообразно и достаточно будет применения уравнения Эйнштейна. В то же время необходимо учитывать критические значения объемного содержания наполнителей более $v > 0,47$ при которых рассмотренные уравнения не работают.

Список литературы / References

1. Меркулов С. И., Есипов С. М., Есипова Д. В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39-48. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. [Merkulov S. I., Esipov S. M., Esipova D. V. Composite systems of external reinforcement of reinforced concrete structures // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2022. No 4. P. 39-48. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48.]
2. Е. Е. Шмойлов, Л. В. Чурсова, М. Ю. Федотов, А. А. Кальгин. Композитные системы внешнего армирования для усиления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 1. С. 44-51. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.01.44-51. – EDN KNOEAE [E. E. Shmoilov, L. V. Chursova, M. Y. Fedotov, A. A. Kalgin. Composite external reinforcement systems for strengthening building structures // Industrial and civil engineering. 2024. No 1. P. 44-51. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.01.44-51. – EDN KNOEAE]
3. Окольникова Г.Э., Зуев С.С., Царева А.Ю. Использование композитных материалов при реконструкции зданий и сооружений // Системные технологии. 2020. № 34. С. 35-38. [Okolnikova G.E., Zuev S.S., Tsareva A.Y. The use of composite materials in the reconstruction of buildings and structures – System technologies. 2020. No 34. P. 35-38]
4. Johannes Tarigan, Randi Meka, Nursyamsi Nursyamsi. The usage of carbon fiber reinforcement polymer and glass fiber reinforcement polymer for retrofit technology building. Johannes Tarigan et al 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 126 012024. DOI 10.1088/1755-1315/126/1/012024.

5. Layang, Samuel. (2021). Fiber reinforced polymer as a reinforcing material for concrete structures. *Balanga: Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*. 9. 41-48. 10.37304/balanga.v9i1.3276.
6. Chen, Yangzhou & Chen, Guoming. (2011). Fatigue test of carbon fiber used in repair and reinforcement on crack. 10.1109/MACE.2011.5988128.
7. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 181 с. [Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Moscow: Stroyizdat, 2007. 181 p.]
8. Эйнштейн А. Новое определение размеров молекул. — Собр. научн. тр., т. 3. - М.: Наука, 1966. С.75-91. [Einstein A. A new definition of the size of molecules. — Collection of scientific works, T. 3. - M.: Nauka, 1966. P.75-91]
9. Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. - М.: Химия, 1979. 439 с. [Manson J., Sperling L. Polymer mixtures and composites. - M.: Chemistry, 1979. 439 p.]
10. Аскадский А. А., Ван С., Кондращенко В. И., Жданова Т. В., Мацевич Т. А. Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66> [Askadskii A. A., Wang C., Kondrashchenko V. I., Zhdanova T. V., Matseevich T. A. Forecasting the elasticity modulus of composites based on polymer blends // *Building materials*. - 2020. – No 7. – P. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66>]
11. Sakaguchi RL, Wiltbank BD, Murchison CF. Prediction of composite elastic modulus and polymerization shrinkage by computational micromechanics. *Dent Mater*. 2004 May;20(4):397-401. doi: 10.1016/j.dental.2003.11.003. PMID: 15019456.
12. Микитаев А. К., Козлов Г. В., Жанситов А. А., Хаширова С. Ю., Заиков Г. Е.. Прогнозирование и регулирование модуля упругости полимеров // *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19, №1. [Mikitaev A. K., Kozlov G. V., Zhansitov A. A., Hashirova S. Yu., Zaikov G. E. Forecasting and regulation of the modulus of elasticity of polymers // *Bulletin of the Technological University*. 2016. Vol. 19, No 1]
13. Полимерные композиты с высокими упругопрочностными характеристиками / С. В. Курин, Л. Н. Шафигуллин, А. В. Лахно, А. А. Бобрышев. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-9282-1405-0. – EDN ZRUAYX. [Polymer composites with high elastic strength characteristics / S. V. Kurin, L. N. Shafigullin, A.V. Lakhno, A. A. Bobryshev. – Penza : Penza State University of Architecture and Construction, 2016. – 124 p. – ISBN 978-5-9282-1405-0. – EDN ZRUAYX.]
14. Панов, А.Г. Моделирование дисперсно-наполненных композиционных материалов с комплексом специальных свойств / А.Г. Панов Л.Н. Шафигуллин, С.В. Курин // *Литейщик России*. 2011. №4. С. 26–29 [Panov, A.G. Modeling of dispersed-filled composite materials with a complex of special properties / A.G. Panov, L.N. Shafigullin, S.V. Kurin // *Foundry of Russia*. 2011. No 4. P. 26-29]
15. Stroganov V. F., Amel'chenko M. O., Mukhametrakhimov R. K. Increasing the Adhesion of Styrene–Acrylic Coatings Modified by Schungite Filler in Protection of Building Materials // *Polymer Science, Series D*. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 162-165. – DOI 10.1134/S1995421222020277. – EDN FJHLIU.
16. Старовойтова И. А., Семёнов А. Н., Зыкова Е. С., Хозин В. Г., Сулейманов А. М. Модифицированные клеевые связующие для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1. Требования к клеям. Технологические характеристики // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-754-11-50-54>. [Starovojtova I.A., Semjonov A.N., Zyкова E.S., Khozin V.G., Sulejmanov A.M. Modified glue binders for systems of external reinforcement of building structures. Part 1. Requirements for glues.

- Technological characteristics. // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2017. No. 11, P. 50–54.]
17. Сулейманов А. М., Зыкова Е. С., Старовойтова И. А., Семенов А. Н. Модифицированные клеевые связующие для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2. Физико-механические характеристики клеев // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 64–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12>. [Sulejmanov A.M., Zyкова E.S., Starovojtova I.A., Semjonov A.N. Modified glue binders for systems of external reinforcement of building structures Part 2. Physical and mechanical characteristics of glue. // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2017. No. 12, P. 64–67.]
18. Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., Бурнашев А. И., Хозин В. Г. Наномодификация древесной муки золями кремниевой кислоты // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 56-67. – EDN OYXUCB. [Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K., Burnashev A. I., Khozin V. G. Nanomodification of wood flour with silicic acid sols // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4, No. 3. – pp. 56-67. – EDN OYXUCB.]

Информация об авторах

Шакиров Алмаз Райнурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alma-94@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Старовойтова Ирина Анатольевна, канд. техн. наук, ООО «Научно-производственная фирма «Рекон», г. Казань, Россия

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

Information about the authors

Almaz R. Shakirov, graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: alma-94@mail.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Irina A. Starovoitova, Ph.D. tech. Sciences, Research and Production Company "Rekon" LLC, Kazan, Russia

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

УДК: 691, 666
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.5
EDN: HGLFIE



Рециклинг металлургического железосодержащего шлака в производстве керамического кирпича на основе гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита

В.З. Абдрахимов¹

¹Самарский государственный экономический университет,
Самара, Российская Федерация

Аннотация. Анализ функционирования кирпичных заводов по запасам качественных высокосортных сырьевых материалов показал их истощение. Следовательно, требуется исследовать и изучить такие отходы производств для применения в качестве отошителей и интенсификаторов спекания, благодаря которым можно будет использовать некондиционное глинистое сырье. Предприятия взяли на вооружение опыт, который использовали еще как инструмент для охраны экологической системы. **Цель работы:** создание и реализация композиций для процесса получения керамического стенового кирпича на основе гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита, которая не дает положительного результата при использовании в качестве самостоятельного сырья без применения отошителя и интенсификатора спекания; **Задачами исследования являются:** а) получение керамического стенового кирпича с повышенными физико-механическими показателями и исследование влияния металлургического железосодержащего шлака на технические показатели изделия на основе некондиционной глины. б) исследование влияния металлургического железосодержащего шлака, получаемого от выплавки меди на технические показатели керамического кирпича. **Результаты.** Выявлено, что высушенный кирпич из гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита, без применения отошителя, после сушки не соответствует требованию нормативов по количеству трещин без разрушения, количеству сквозных трещин и многочисленных посечек в результате высокой чувствительности шихты к сушке. Металлургический шлак, введенный в керамическую массу на основе кыштырлинской глины, даже в количестве 10% снижает трещинообразование, повышает прочность (при сжатии и изгибе) и морозостойкость. Оптимальным составом для выпуска керамического кирпича является состав, содержащий 15% шлака. **Выводы.** Исследованиями выявлено, что трещинообразование при производстве кирпича на основе глины Кыштырлинского месторождения без применения отошителей наблюдается в следующих пропорциях: в туннельных сушилках -51% (от общего количества трещин) и после обжига (в печах) – 49%, приблизительно в равных частях. Металлургический шлак снижает трещинообразование, повышает технические показатели. Оптимальным составом для выпуска керамического кирпича является состав, содержащий 15% шлака, марка кирпича при таком содержании соответствует М125 и исключает различные виды брака на изделиях. Дальнейшее увеличение содержания металлургического шлака не снижает марочность кирпича, но при этом появляются различные виды брака, например, черная сердцевина.

Ключевые слова: гидрослюдистая глина, железосодержащий металлургический шлак, керамический кирпич, рециклинг, технические показатели

Для цитирования: Абдрахимов В.З. Рециклинг металлургического железосодержащего шлака в производстве керамического кирпича на основе гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 41-50, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.5, EDN: HGLFIE

Recycling of metallurgical iron-containing in the production of ceramic bricks based on hydrosilic low-melting clay with an admixture of montmorillonite

V.Z. Abdrakhimov¹

¹Samara State University of Economics, Samara, Russian Federation

Abstract. The analysis for the functioning of brick factories and stocks of high-quality high-grade raw materials showed their depletion. Therefore it is necessary to investigate and study such waste products if it is possible to use them as leaners and sintering intensifiers, thanks to which it will be possible to use substandard clay raw materials. Enterprises have adopted such experience, which they also used as a tool for protecting environmental systems. **The purpose of the work:** a) creation and implementation of compositions for the process of obtaining ceramic wall bricks based on hydrosilic low-melting clay with an admixture of montmorillonite, which does not give a positive result when used as an independent raw material without the use of a leaner and sintering intensifier; b) to investigate the effect of metallurgical iron-containing slag obtained from copper smelting on the technical characteristics of ceramic bricks. **Results.** It was revealed that the dried brick made of hydrosilic low-melting clay with an admixture of montmorillonite, without the use of a leaner, after drying does not meet the requirements of State Codes (GOST) in terms of the number of cracks without destruction, the number of through cracks and numerous cuts as a result of the high sensitivity of the charge to drying. Metallurgical slag introduced into the ceramic mass based on Kyshtyrli clay even in an amount of 10% reduces the number of cracks, increases strength (compression and bending) and frost resistance. The optimal composition for the production of ceramic bricks is a composition containing 15% slag. **Conclusions.** Studies have revealed that cracking in the production of bricks based on the Kyshtyrlynsky clay deposit without the use of leaners is observed in the following proportions: in tunnel dryers -51% (of the total number of cracks) and after firing (in furnaces) – 49%, approximately in equal parts. Metallurgical slag reduces the number of cracks, increases technical performance. The optimal composition for the production of ceramic bricks is a composition containing 15% slag, the grade of brick with such a content corresponds to M125 and excludes various types of defects on products. A further increase in the content of metallurgical slag does not reduce the grade of the brick, but at the same time various types of defects appear, for example, a black core.

Keywords: hydrosilic clay, iron-containing metallurgical slag, ceramic brick, recycling, technical indicators

For citation: Abdrakhimov V.Z. Recycling of metallurgical iron-containing in the production of ceramic bricks based on hydrosilic low-melting clay with an admixture of montmorillonite // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 41-50, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.5, EDN: HGLFIE

1. Введение

Сырьевая ситуация. Одной из основных проблем для процесса изготовления керамических изделий массового потребления является истощение легкоплавких глин [1, 2]. К подобным изделиям в первую очередь относится керамический кирпич, полученный на основе легкоплавких гидрослюдистых глин с применением отошителей.

Значительная доля гидрослюдистых легкоплавких глинистых компонентов Западной Сибири, как и многих других регионов России, содержит повышенное количество оксида железа ($Fe_2O_3 > 3\%$) и примесей монтмориллонита. Монтмориллонитовые глины восприимчивы к влаге, в результате чего такое сырье увеличивается в 40 раз по объему, а керамический кирпич при сушке растрескивается. Такие глинистые компоненты не могут использоваться без отошителей как самостоятельное сырье для получения керамического кирпича.

Глинистые компоненты, содержащие повышенное количество оксида железа, которые присутствуют в виде примесей, приобретают красноватый цвет. Положительное

действие этих примесей, содержащих оксид железа в количестве более 5%, выявляется в том, что во время термообработки изделия в восстановительной среде они понижают температуру обжига за счет перехода оксида железа в закисные формы [1, 3].

Молекулярная концентрация оксида железа при восстановлении Fe_2O_3 до FeO удваивается, что влечет за собой заметное понижение температуры термообработки керамического материала, но при этом происходит еще и газовыделение от продуктов, участвующих в реакции [4-6]. Эти параметры демонстрируют кардинальные воздействия на результат образования как прочного, так и пористого конгломерата керамики. Повышение реакционной способности жидкой фазы по отношению к тугоплавким кристаллическим составляющим дает возможность интенсифицировать процесс спекания, что позволяет уменьшить расход топлива.

Наращивание активности текучей фазы с единовременной убылью температуры структурирования регулируют с помощью использования определенного количества железа. Оксид железа интенсифицирует растворение кварца в расплаве, способствуя тем самым возрастанию прочности [6].

Экологическая ситуация. Существует множество побочных продуктов, остающихся от выплавки черного и цветного металлов, но основным отходом этих производств является шлак, который представляет собой продукт распада руды. Он может иметь разнородный состав, различные свойства и характеристики. Состав металлургического шлака неоднороден, имеет многокомпонентную структуру. Фактически, шлак представляет собой химический сплав оксидов, занимающих от 90 до 95% объема с выходом на 1 т. цветных металлов до 200 тонн шлаков, а черных от 100 до 700 тонн, с классом опасности – IV, т.е. вредный для окружающей среды [7-9].

Исследования автора в работе [10] свидетельствует о значительных скоплениях в уральском регионе лежалых медных шлаков, количество которых достигло 110 млн. тонн, причем годовое нарастание составляет более 10 млн т. Предприятие, находящееся на Урале, АО «Карабашмедь» (город Карабаш) работает с медными концентратами, месторождения которых находятся в России и в Казахстане, в результате чего появляется громадное количество металлургического железосодержащего шлака. В окрестностях Карабаша шлаки, которые представляют собой техногенный мусор, практически заняли всю северную и центральную территорию окраины города, причем отдельные возвышенности отвала уже достигли 30-40 м [11].

Аккумуляция больших объемов шлаков создает цикл существенных проблем, которые негативно влияют на экологическую среду. Трансформации окружающей среды из-за ее зашлаковывания способствует деградации экологии, ухудшению здоровья граждан, повышению заболеваемости легких, сердечно-сосудистой системы, заболеваний аллергического характера и заметное сокращение продолжительности жизни, рост смертности. В сфере функционирования металлургических предприятий загрязняются как поверхностные источники питьевой воды, так и подземные, что порождает расстройство функции желез внутренней секреции, желудочной системы, увеличение опасных кишечных инфекций.

В производстве цветных металлов появляются многообразные химические ингредиенты, чаще всего токсичные: фторсодержащие, сера, оксиды металлов и многие другие, которые при нахождении в воде и воздухе ухудшают ресурсы, как водного бассейна, так и саму атмосферу, серьезно угрожая территориальной флоре и фауне. В соответствии с исследованиями Росстата второе место по загрязнению экологических систем занимает металлургическая промышленность после топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Но в самой металлургии доминирует всё-таки цветная, после нее находится черная.

К основной отрасли по использованию отходов можно отнести строительные материалы, где целесообразно применять локальное сырье и отходы производств, к которым относятся техногенное сырье ТЭК, цветной и черной металлургии, шламы стекольной промышленности и многие другие [12-15].

В качестве железосодержащих добавок для получения керамического кирпича целесообразно использовать железосодержащий металлургический шлак, образующийся

в результате выплавки меди, и таким образом, в процессе производства кирпича будет осуществляться эффективная утилизация шлака.

Цель работы: создание и реализация композиций для процесса получения керамического стенового кирпича на основе гидрослюдистой легкоплавкой глины с примесью монтмориллонита, которая не дает положительного результата при использовании ее в качестве самостоятельного сырья без применения отощителя и интенсификатора спекания.

Объектом исследования являются: металлургический железосодержащий шлак, некондиционный глинистый материал, керамический кирпич.

Задачами исследования являются:

а) получение керамического стенового кирпича с повышенными физико-механическими показателями и исследования влияния металлургического железосодержащего шлака на технические показатели изделия на основе некондиционной глины.

б) определение оптимального количества шлака для получения керамического кирпича с повышенными техническими показателями.

2. Материалы и методы

В данной статье использовались оригинальные методы тонкого анализа для оценки пригодности сырьевых материалов: для определения поэлементного анализа и микроструктуры - японский микроскоп фирмы Jeol и растровый электронный микроскоп JSM 6390A, для петрографического анализа использовались прозрачные аншлифы и шлифы с применением микроскопа МИН-8 и МИН-7 и иммерсионные жидкости. Технические показатели определялись по ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камни керамические».

Для получения керамического кирпича использовались следующие сырьевые компоненты: в качестве связующего глинистого компонента – кыштырлинская глина, а в качестве отощителя и интенсификатора спекания – металлургический шлак (металлургический железосодержащий шлак получается от выплавки меди). Основные свойства и показатели сырьевых компонентов: химические составы, усреднённый оксидный приведен табл. 1, поэлементный в табл. 2, технологические показатели в табл. 3, микроструктура на рис. 1, а минеральный состав на рис. 2.

Таблица 1

Усредненный оксидный химический состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
1. Кыштырлинская глина	60,59	16,55	7,22	1,25	1,32	2,6	10,57
2. Металлургический шлак	41,88	7,78	33,12	11,21	4,20	1,81	–

Примечание: п.п.п. – потери при прокаливании; R₂O=K₂O+Na₂O

Таблица 2

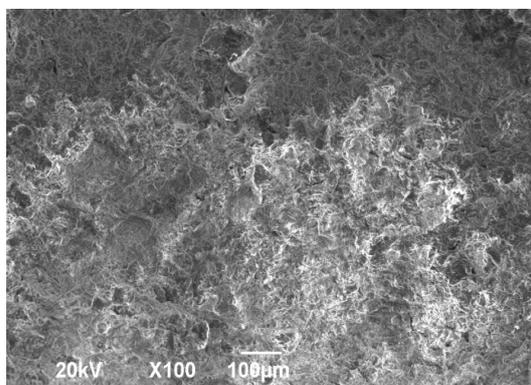
Поэлементный химический состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
1. Кыштырлинская глина	3,73	54,87	0,46	0,43	7,23	28,65	0,75	0,53	3,35
2. Металлургический шлак	-	46,56	0,41	3,83	4,65	20,9	0,83	8,24	14,58

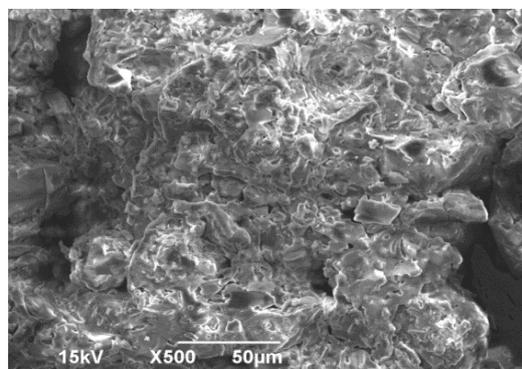
Таблица 3

Технологические показатели сырьевых компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. Кыштырлинская глина	600	1250	1280	1300
2. Metallургический шлак	—	1100	1150	1180



а



б

Рис. 1. Микроструктура сырьевых компонентов: а) – кыштырлинская глина; б) – металлургический шлак. Увеличение а) x100; б) x500 (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Microstructure of raw materials components: a) – Kyshtyrli clay; б) – metallurgical slag. Magnification а) x100; б) x500 (illustration by the author)



а



б

Рис. 2. Минеральный состав сырьевых компонентов: а) – кыштырлинская глина; б) – металлургический шлак (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Mineral composition of raw materials: а) – Kyshtyrli clay; б) – metallurgical slag (illustration by the author)

В Тюменской области располагается глина *Кыштырлинского месторождения*. Обследуемый глинистый компонент квалифицируется как дисперсный, группа в которой тонкодисперсные фракции (частицы) размером 0,001мм располагаются в количестве от 40 до 60% (табл. 4), по числу пластичности (число пластичности – 24) - среднепластичное глинистое сырье, а по чувствительности к сушке – высокочувствительное, поэтому такое глинистое сырье непригодно без отощителей в производстве керамического кирпича.

Таблица 4

Фракционный состав кыштырлинской глины				
Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
>0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
0,6	14,1	17,5	21,1	46,6

По итоговому нахождению $Al_2O_3+TiO_2$ в глине компонент принадлежит к полукислым с высоким нахождением красящих оксидов (Fe_2O_3 более 3%, табл. 1), по огнеупорности к классу – легкоплавкое глинистое сырье (1300°C, табл. 3), по спекаемости относится к неспекающимся, т.е. не способен при обжиге давать черепок без признаков пережога с водопоглощением не более 5%, плотность 2,04-2,42 г/см², а цвет глины – от розового до светло-коричневого.

Железосодержащий металлургический шлак получается от выплавки меди и является отходом АО «Карабашмедь», которое является градообразующим предприятием города Карабаш, Челябинской области. Ключевая деятельность предприятия – это извлечение из медного концентрата черновой меди, причем в это входит предварительное обогащение медно-цинковых руд и вторичного медьсодержащего сырья.

В табл. 5 отображён фракционный состав шлака. Состав, как видно из табл. 5, позволит без предварительного дробления и отсева, вводить его в композицию (шихту) для производства кирпича.

Таблица 5

Фракционный состав металлургического шлака					
Фракция, мм	<0,315	0,315-0,63	0,63-1,25	1,25-2,5	>2,5
Содержание, (мас. %)	9,8	27,9	29,8	28,7	3,8

Основными фазами в исследуемом шлаке (50%, рис. 2) являются стеклофаза и фаялит ($Fe_2[SiO_4]$), который в изучаемом шлаке «пропитан» вкрапленными частичками магнетита и ферритами.

По всему объему шлака отмечается стеклофаза, которая выполняет роль связующего между фаялитом, муллитом, анортитом, пижонитом, и ферритом (рис. 2, б). Силикатный химический состав стеклофазы подобен составу стекла алюмосиликатного типа: $(Ca, Na, Fe, Al)[(Si, Al)_xO_y]$, $(Ca, Mg, Fe, Al)[(Si, Al)_xO_y]$. Плотность обыкновенного листового стекла обычно колеблется в пределах 2,42-2,60 г/см³, а плотность исследуемой стеклофазы – 3,51 г/см³, что свидетельствует о переходе части оксида железа в стеклофазу.

Получение керамического кирпича. Разрабатывали керамическую композицию (шихту) по рецептуре, представленной в табл. 6, пластическим способом при влажности 22-24 %. Сформованный кирпич размером 120X120X60 мм, высушивали до остаточной влажности 5%, высушенный кирпич-сырец обжигали при температуре 1000°C.

Таблица 6

Составы экспериментальных масс					
Компонент, показатель	Содержание компонентов, мас. %				
	1	2	3	4	5
1. Кыштырлинская глина	100	90	15	20	25
2. Металлургический шлак	-	10	85	80	75
Характеристики керамической шихты и высушенного кирпиче-сырца					
Пластичность шихты	24	20	18	16	13
Чувствительность к сушке шихты, класс	высокочувствительная	высокочувствительная	среднечувствительная	среднечувствительная	малочувствительная
Усадка высушенного кирпича, %	6,2	5,9	5,3	4,8	4,2

Окончание таблицы 6

Трещины согласно требованиям ГОСТа 530-2012 Кирпич и камень керамические. Общие технические условия					
Трещины шириной раскрытия более 0,5 мм, количество трещин	18	2	-	-	-
Сквозная трещина	3 (не допуск.)	1	-	-	-
Посечка	22	12	5	-	-
Примечание: 1. Сквозная трещина, проходящая через всю толщину изделия, протяжённостью более половины ширины изделия. С таким браком изделие не соответствует требованию ГОСТа. 2. Посечка – трещина шириной раскрытия не более 0,5 мм					

В настоящее время на кирпичных заводах кирпич-сырец сушится в туннельных сушках в течение 24-55 часов в зависимости от глины, ее количества и свойств (в первую очередь от чувствительности к сушке) и от отошителя также в зависимости от количества и свойств.

Сушка кирпича-сырца, полученного по составам №1-5 (табл. 6) реализовывалась в производственных условиях, соблюдая следующие параметры сушки: время – 48 (двое суток), температура – 50-80°C, а отработанного теплоносителя – 25- 40°C, при расходе теплоносителя на одну туннель – 3000-10000 м³/ч. Технические показатели (физико-механические) кирпича после термообработки представлены в табл. 7.

Таблица 7

Технические показатели кирпича

Показатель	Составы				
	1	2	3	4	5
1. Прочность при сжатии, МПа	8,5	10,2	12,8	13,4	12,2
2. Прочность при изгибе, Мпа	1,5	2,3	2,6	2,8	2,7
3. Морозостойкость, циклы	7	19	27	35	30
4. Сквозная трещин	4	1	-	-	-
5. Черная сердцевина	-	-	-	есть	расширенная
Марка кирпича	-	100	125	125	100
Примечание: черная сердцевина: Участок внутри изделия, обусловленный образованием в процессе обжига изделия оксида железа (II).					

3. Результаты и обсуждение

Как видно из табл. 6 образцы из состава №1 после сушки не соответствуют требованию нормативов по количеству разрывов без разрушения, количеству сквозных трещин и многочисленных посечек в результате высокой чувствительности шихты к сушке.

Чувствительность к сушке — это признак (характеристика) противоположный представлению о трещиностойкости сформованного полуфабриката при его сушке. Основанием для происхождения трещин в первую очередь служит разный рост усадки как по поверхности, так и по сечению полуфабриката, в итоге чего в вышеперечисленных местах возникают напряжения, переходящие в трещины [1, 5, 6]. Исследованиями выявлено, что трещинообразование при производстве кирпича наблюдается в следующих пропорциях: в туннельных сушилках -51% (от общего количества трещин) и после обжига (в печах) – 49%, приблизительно в равных частях, как и в работе [16].

Металлургический шлак, введенный в керамическую массу на основе кыштырлинской глины даже в количестве 10%, снижает количество трещин, повышает прочность (при сжатии и изгибе) и морозостойкость. Оптимальным составом для выпуска керамического кирпича является состав №3, содержащий 15% шлака, марка кирпича при

таком содержании соответствует М125 и отсутствуют различные виды брака на изделиях. Дальнейшее увеличение содержания металлургического шлака не снижает марочность кирпича, но при этом появляются различные виды брака, например черная сердцевина (табл. 7).

Возникновение «черной сердцевины» объясняется возникновением градиента температур при термообработке керамического кирпича, причем следует отметить, что внутренние слои имеют меньшую температуру, чем внешние [16, 17]. При температуре обжига в области 950-1000°C на поверхности кирпича протекает эндотермическая реакция: $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, (1) а во внутренней части происходит реакция обратного характера: $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$. (2)

Следствием этих реакций послужило появление разности парциальных давлений между СО и СО₂, которая в последствии с поверхности диффундирует во внутрь кирпича. Внутренние слои с накоплением углерода окрашиваются в чёрный цвет.

Заключение

1. Установлено, что образцы из кыштырлинской глины без применения отошителей не соответствуют требованию ГОСТа по количеству разрывов без разрушения, количеству сквозных трещин и многочисленных посечек в результате высокой чувствительности шихты к сушке.

2. Исследованиями выявлено, что трещинообразование при производстве кирпича на основе глины Кыштырлинского месторождения без применения отошителей наблюдается в следующих пропорциях: в туннельных сушилках -51% (от общего количества трещин) и после обжига (в печах) – 49%, приблизительно в равных частях, как и в работе.

3. Металлургический шлак, введенный в керамическую массу на основе кыштырлинской глины даже в количестве 10%, снижает количество трещин, повышает прочность (при сжатии и изгибе) и морозостойкость. Оптимальным составом для выпуска керамического кирпича является состав, содержащий 15% шлака, марка кирпича при таком содержании соответствует М125 и отсутствуют различные виды брака на изделиях. Дальнейшее увеличение содержания металлургического шлака не снижает марочность кирпича, но при этом появляются различные виды брака, например черная сердцевина.

Список литературы / References

1. Тезиков Н.Н. Обзор керамических материалов. // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 6. С. 28-38. [Tezikov N.N. Review of ceramic materials. // International student scientific bulletin. – 2018. – No. 6. P. 28-38.]
2. Толкачев В.Я. Кирпич керамический. СПб: Наука и производство, 2014. 160 с. [Tolkachev V.Ya. Ceramic brick. St. Petersburg: Science and Production, 2014. 160 p.]
3. Nailia Rakhimova, Montmorillonite clays in Portland clinker-reduced, non-clinker cements, and cement composites: A review, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134678, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134678.
4. Толкачева А.С., Павлова И.А. Технологии тонкой керамики. Екатеринбург, Уральский университет, 2018. 184 с. [Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. Technologies of fine ceramics. Ekaterinburg, Ural University, 2018. 184 p.]
5. Khuziakhmetova, K. Polymer mixtures based on polyvinyl chloride for the production of construction materials / K. Khuziakhmetova, L. Abdrakhmanova, R. Nizamov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 169. – P. 14-21. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_2. – EDN TDMAAU.
6. Наномодификация древесной муки золями кремниевой кислоты / Л. А. Абдрахманова, Р. К. Низамов, А. И. Бурнашев, В. Г. Хозин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 56-67. – EDN OYXUCB. [Nanomodification of wood flour with silicic acid salts / L. A. Abdrakhmanova, R. K. Nizamov, A. I. Burnashev, V. G. Khozin // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4, No. 3. – P. 56-67. – EDN OYXUCB.]

7. Vdovin, E. A. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures / E. A. Vdovin, V. F. Stroganov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference Interstroyneh - 2019, ISM 2019, Kazan, September, 12–13, 2019. Vol. 786. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012065. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012065. – EDN CZWWRN.
8. Residues from fuel and power industries and glass industry as a basis of building materials / G. Medvedeva, A. Lifanteva, A. Yusupova, R. Kashapov // IOP conference series: Materials Science and Engineering, Kazan, April, 29, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012095. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012095. – EDN OIZMFR.
9. Егорова Л.Р. Исследование керамических материалов, полученных из легкоплавких глин с применением кремнистых пород // Научный прогресс. М.: 2017, №8. 19–23. [Egorova L.R. Study of ceramic materials obtained from low-melting clays using siliceous rocks // Scientific progress. M.: 2017, No. 8. P. 19–23.]
10. Дубинецкий В.В., Вдовин К.М., Бутримова Н.В. Синтез модифицированного керамического материала на базе кальцийсодержащего техногенного сырья // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №11. С. 66-71. [Dubinetsky V.V., Vdovin K.M., Butrimova N.V. Synthesis of modified ceramic material based on calcium-containing technogenic raw materials // Industrial and civil construction. 2017. No. 11. P. 66-71.]
11. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонов Л.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2019. №3. С. 11-15. [Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonov L.V. The material composition of slag from the Karabash copper smelter // Bulletin of the Moscow State Technical University named after G.I. Nosov. 2019. No.3. P. 11-15.]
12. Рахимов Р. З. Экология, металлургия, минеральные вяжущие вещества и промышленность строительных материалов // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 26-31. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-31. – EDN MOIBYZ. [Rakhimov, R. Z. Ecology, metallurgy, mineral binders and the construction materials industry // Construction materials. – 2022. – No. 9. – P. 26-31. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-31. – EDN MOIBYZ]
13. Vasilev, K.O., Makarenko, S.V., Khokhryakov, O.V., Khozin, V.G. Production of ash ceramics using ash and slag mixtures of thermal power plants and local raw materials of the Irkutsk region. / American Institute of Physics Conference Series 2434. doi:10.1063/5.0091786
14. Development of road soil cement compositions modified with complex additive based on polycarboxylic ether / P. E. Bulanov, E. A. Vdovin, L. F. Mavliev, D. A. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, December, 04–06, 2017. Vol. 327. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 032014. – DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032014. – EDN XXESMX.
15. Тараканов О.В., Шешкина К.А. Применение отходов производства и местных сырьевых ресурсов в производстве строительных материалов // Вестник магистратуры. 2014. Том 1. №12. С. 82-85. [Tarakanov O.V., Steshkina K.A. The use of industrial waste and local raw materials in the production of building materials // Bulletin of the magistracy. 2014. Volume 1. No. 12. P. 82-85.]
16. Гнездов Е.Н., Ракутина Д.В., Бухмиров В.В. Исследование качества керамического кирпича после сушки и обжига по технологии фирмы «FUCHS» // Вестник ИГЭУ. 2005. Вып. 1. С. 1-5. [Gnezdov E.N., Rakutina D.V., Bukhmirov V.V. Investigation of the quality of ceramic bricks after drying and firing according to FUCHS technology // Bulletin of IGEU. 2005. Issue 1. P. 1-5.]
17. Эркенов М. М., Ананьева С. Н. Определение качества обжига керамического кирпича // Строительные материалы. 1993. №3. С. 14-16. [Erkenov M. M., Ananyeva S. N. Determination of the quality of firing ceramic bricks // Building materials. 1993. No.3. P. 14-16.]

18. Абдрахимов В.З. Исследование железосодержащего традиционного природного и техногенного сырья на спекание керамических материалов. Влияние ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} на образование низкотемпературного муллита. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительного университета. 2009. 428 с. [Abdrakhimov V.Z. Research of iron-containing traditional natural and man-made raw materials for sintering ceramic materials. The effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions on the formation of low-temperature mullite. Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering. 2009. 428 p.]

Информация об авторах

Абдрахимов Владимир Закирович, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Российская Федерация
Email: 3375892@mail.ru

Information about the authors

Vladimir Z. Abdrakhimov, doctor of technical sciences, professor, Samara State University of Economics, Samara, Russian Federation
Email: 3375892@mail.ru

УДК: 625.855.3
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6
EDN: HJQTES



Обоснование выбора асфальтогранулобетонных смесей типов М и К с позиции совместной работы слоев основания и покрытия дорожной одежды

В.С. Лесовик¹, В.П. Денисов¹, М.Д. Кабалин¹, М.А. Высоцкая¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Динамичное и устойчивое развитие дорожно-строительного сектора требует инновационного развития и перехода к технологиям «зеленого развития», подразумевающим снижение воздействия на окружающую среду и уменьшение углеродного следа, а также реформ в сфере производства экологически чистых, экономичных строительных материалов и технологии работы с ними. Технология холодного ресайклинга отвечает вызовам современности. Однако в настоящее время находится на стадии своего становления и требует активности в области исследований о преимуществах и недостатках того или иного вида асфальтогранулобетона, его долговечности и совместной работы с асфальтобетоном. Цель работы заключается в изучении и сравнительном анализе асфальтогранулобетонов типов М и К с позиции физико-механических и эксплуатационных свойств, а также оценки их совместной работы с асфальтобетоном в конструкции дорожных одежд автомобильных дорог. Задачами исследования являются: исследование влияния минерального и комплексного вяжущих на физико-механические и эксплуатационные показатели асфальтогранулобетона; оценка влияния методологии подбора и испытания композитов; анализ эффективности совместной работы асфальтогранулобетонов типов М и К с асфальтобетоном.

Результаты. В работе представлены результаты исследований асфальтогранулобетонов типов М и К подобранных и испытанных по двум различным методикам. Полученные данные продемонстрировали, что асфальтогранулобетон типа К по показателям свойств наиболее близок к асфальтобетону. При использовании в составе асфальтогранулобетонов цемента наблюдается уменьшение его прочностных характеристик при испытании на изгиб при температуре 0°C относительно асфальтобетона. Так предел прочности при изгибе уменьшился более чем на 20%, а деформация более чем на 40%; предел прочности при сжатии при температуре +20°C после 10 циклов замораживания-оттаивания и коэффициент морозостойкости понизились в 2 и 3 раза соответственно. Анализ лабораторной модели конструкции дорожной одежды, состоящей из «АГБ типа К + асфальтобетон» продемонстрировал, что предел ее прочности на изгиб при температуре +20 °C и деформация превышают показатели аналогичной модели из «АГБ типа М + асфальтобетон» на 13% и 185% соответственно.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что выявлены особенности совместной работы асфальтогранулобетонных слоев с асфальтобетоном. Наилучшей совместной работой характеризуются сборные конструкции, выполненные из асфальтогранулобетона типа К и асфальтобетона в виду близости прочностных и деформативных характеристик в широком диапазоне температур. Для обеспечения показателей водо- и морозостойкости составы асфальтогранулобетона типа М требуют корректировки специальными добавками.

Ключевые слова: асфальтогранулят, битумная эмульсия, цемент, асфальтогранулобетон, асфальтобетон, жесткость, сборные конструкции, прессование, уплотнитель Маршалла

Для цитирования: Лесовик В.С., Денисов В.П., Кабалин М.Д., Высоцкая М.А. Обоснование выбора асфальтогранулобетонных смесей типов М и К с позиции совместной работы слоев основания и покрытия дорожной одежды // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 51-62, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6, EDN: HJQTES

Justification for the choice of asphalt granuloconcrete mixtures of types M and K from the perspective of the joint work of base layers and pavement surface

V.S. Lesovik¹, V.P. Denisov¹, M.D. Kabalin¹, M.A. Vysotskaya¹
¹Belgorod Shukhov State Technological University,
Belgorod, Russian Federation

Abstract: *Statement of the problem.* The dynamic and sustainable development of the road construction sector requires innovative development and a transition to “green development” technologies, which involve reducing the impact on the environment and reducing the carbon footprint, as well as reforms in the production of environmentally friendly, cost-effective building materials and technologies for working with them. Cold recycling technology meets the challenges of our time. However, it is currently at its formative stage and requires activity in the field of research on the advantages and disadvantages of this or that type of asphalt granuloconcrete, its durability and collaboration with asphalt concrete. The purpose of the work is to study and comparatively analyze asphalt granuloconcrete types M and K from the standpoint of physical, mechanical and operational properties, as well as to evaluate their joint work with asphalt concrete in the design of road pavements. The objectives of the work are to study the influence of mineral and complex binders on the physical, mechanical and operational characteristics of granular asphalt concrete; to assess the impact of the methodology for selecting and testing composites; to analyze the effectiveness of joint work of asphalt granuloconcrete types M and K with asphalt concrete.

Results. The paper presents the results of studies of asphalt granuloconcrete types M and K selected and tested using two different methods. The obtained data demonstrated that asphalt granuloconcrete of type K is closest to asphalt concrete in terms of properties. When cement is used as a part of asphalt granuloconcrete, a decrease in its strength characteristics is observed when bending at a temperature of 0 ° C relative to asphalt concrete. Thus, the bending strength decreased by more than 20%, and the deformation by more than 40%; the compressive strength at a temperature of +20°C after 10 freeze-thaw cycles and the frost resistance coefficient decreased by 2 and 3 times respectively. The analysis of the laboratory model of the pavement structure consisting of "AGB type K + asphalt concrete" demonstrated that its bending strength at a temperature of +20 °C and deformation exceeded the indicators of a similar model from "AGB type M + asphalt concrete" by 13% and 185% respectively.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that the features of the joint work of asphalt granuloconcrete layers with asphalt concrete have been identified. The best joint work is characterized by prefabricated structures made of asphalt granuloconcrete type K and asphalt concrete due to the similarity of strength and deformation characteristics in a wide temperature range. To ensure water and frost resistance, compositions of type M asphalt granular concrete require adjustment with special additives.

Keywords: granulated asphalt, bitumen emulsion, cement, granulated asphalt concrete, asphalt concrete, rigidity, prefabricated structures, pressing, Marshall compactor

For citation: Lesovik V.S., Denisov V.P., Kabalin M.D., Vysotskaya M.A. Justification for the choice of asphalt granuloconcrete mixtures of types M and K from the position of joint work of base layers and pavement surface // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 51-62, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.6, EDN: HJQTES

1. Введение

Деятельность человечества всегда была тесно связана с воздействием на окружающую среду. Ход истории демонстрирует, что природные ресурсы, с различной степенью интенсивности, подвергались чрезмерной, временами агрессивной эксплуатации, превращаясь в энергию, разнообразные товары, а также сырьевые полуфабрикаты и готовую продукцию. В этой череде трансформаций постепенная деградация окружающей среды неизбежна.

С точки зрения воздействия на окружающую среду и потребления природных ресурсов дорожная отрасль [1-3] вносит значимый вклад. Активность дорожно-строительного комплекса сопряжена с одной стороны с увеличением потребности в дорожно-строительных материалах, а с другой - образованием сопутствующих отрасли техногенного сырья и отходов. Очевидно, что динамичное и устойчивое развитие отрасли должно реализовываться в направлении инновационного развития с переходом к технологиям «зеленого развития» [4,5], подразумевающим снижение прессинга на окружающую среду, уменьшение углеродного следа, и реформами в сфере производства экологически чистых, экономичных строительных материалов и технологии работы с ними.

Анализируя вышеизложенное, логично сокращение объемов вовлекаемых в отрасль первичных сырьевых ресурсов: минерального материала (щебня, отсева дробления и минерального порошка), а также органических вяжущих. Однако учитывая высокую долю дорог регионального и межмуниципального значений, не соответствующих нормативным требованиям по регионам [6], очевидна необходимость в увеличении сырьевой базы для удовлетворения нужд отрасли. Реализация такой дуальной задачи возможна посредством широкого внедрения в отрасль технологии переработки асфальтового гранулята и, в первую очередь, методом холодной регенерации или ресайклинга [7-9], отвечающей актуальной повестке современности с переходом к технологиям и социальной инфраструктуре, нацеленным на защиту среды обитания человека [10-12] Что в полной мере отвечает подходам используемым в геонике (геомиметике) [10], оптимизирующим системы «человек – материал – среда обитания».

Технология холодной ресайклинга также позволяет, вовлекая существующие слои дорожной одежды из асфальтобетона и частично щебня, решить задачу формирования устойчивых гомогенных слоев несущего основания или покрытия автомобильных дорог. из асфальтогранулобетонной смеси. Формированию этого слоя предшествует значительный перечень операций, необходимых для создания оптимальной структуры композита. Тщательное изучение фактического состояния существующего покрытия, с оценкой толщины каждого из слоев, является необходимым условием для подбора рецептуры смеси. На этом этапе должно выполняться назначение вида и содержание вяжущих компонентов, а также оценка необходимости введения скелетного компонента – первичного щебня [9,13].

Динамика развития популярности слоев дорожных одежд из вторичного асфальтобетона нашла свое отражение и в нормативной документации. Рассмотрим последовательность изменений нормативной базы. Это необходимо, так как определяет вектор исследований и набор используемых экспериментальных инструментов.

1. ОС-568-р «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способом холодной регенерации».
2. СТО НОСТРОЙ 2.25.35-2011 «Устройство оснований дорожных одежд. Часть 7 строительство оснований с использованием асфальтобетонного гранулята».
3. СТО НОСТРОЙ 2.25.159-2014 «Холодная регенерация конструктивных слоев для устройства оснований дорожных одежд»
4. СТО 03441578-0005-2016 «Смеси асфальтогранулобетонные и асфальтогранулобетон для автомобильных дорог»
5. ПНСТ 306-2018 «Смеси органоминеральные холодные с использованием переработанного асфальтобетона (РАП)»
6. ОДМ 218.6.1.005-2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации».

7. Серия ГОСТ Р 70197.1 – 2022, ГОСТ Р 70197.2 – 2022 и ГОСТ Р 70197.3 – 2022. «Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона».

Значимый объём нормативной базы по тематике исследования является индикатором актуальности и значимости для отрасли вопросов вторичной переработки асфальтобетона методом холодной регенерации. Однако вызывает некоторую неоднозначность в терминологии. Так, например, в соответствии с ОС-568-р такие композиты назывались АГБ типов М, К, Э, В и так далее, в зависимости от применяемого вида вяжущего вещества или их комплекса.

ОДМ 218.6.1.005-2021 предлагает выполнять классификацию с учетом агрегатного состава асфальтобетонного гранулята и подразделять смеси для слоев основания (О) и покрытия (П). Также сохранилось деление по используемому в композите вяжущему. Таким образом, асфальтогранулобетон в редакции этого документа классифицируется как: АГБС 32-К-О или АГБС 16-В-П и так далее.

Вступившая в действие серия ГОСТ Р 70197 внесла в терминологию понятие «ОМС» - смеси органоминеральные холодные. Теперь смеси с содержанием асфальтогранулята классифицируются как ОМС 16К и М или ОМС 32К и М. Очевидно новшества в классификации определены тем, что типы асфальтогранулобетона М и К являются наиболее используемыми в отрасли.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что в настоящее время доступная информация в части технологии холодной регенерации носит общий изменчивый характер. Можно ознакомиться с трудами [14-16] касательно проектирования оптимальных составов асфальтогранулобетонов. Однако исследования ограничены рамками актуальной нормативной базы и не учитывают технических и климатических особенностей последующей эксплуатации композита в покрытии [7]. Сложно найти мотивированные данные о преимуществах и недостатках того или иного вида гранулятных материалов, об их долговечности и уровню надежности. Таким образом, являясь актуальным и перспективным направлением исследований, холодная регенерация содержит значительное количество «слепых» пятен, что объяснимо. Рассматриваемая технология проходит стадию своего становления и требует активности в области исследований и стабилизации нормативной базы. Очевидно, что использование механизмов техногенного метасоматоза в формировании структур дорожных композитов, а также принципа «средства структур» [10] при проектировании конструкций дорожных одежд, позволит обеспечить прогнозируемый жизненный цикл транспортного сооружения.

Целью представленного исследования является изучение и сравнительный анализ асфальтогранулобетонов типов М и К с позиции их физико-механических и эксплуатационных свойств, а также оценка их совместной работы с асфальтобетоном в конструкции дорожных одежд автомобильных дорог. Объектом исследований выступал асфальтогранулобетон типов М и К. Предмет исследований – влияние вида используемого вяжущего, методики подбора и испытания асфальтогранулобетона на его физико-механические и эксплуатационные показатели.

Задачами исследования являются:

- исследование влияния минерального и комплексного вяжущего на физико-механические и эксплуатационные показатели АГБ;
- оценка влияния методологии подбора и испытания композитов из асфальтогранулята;
- сравнительный анализ эффективности совместной работы АГБ типов М и К с асфальтобетоном.

2. Материалы и методы

В соответствии с планом эксперимента, первая часть исследований по подбору составов композитов выполнялась в соответствии с ОС-568-р «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способом холодной регенерации». Подбирались АГБ типов М и К.

На следующем этапе, ввиду изменений в нормативной базе, исследования строились в соответствии с ОДМ218.6.1.005-2021 «Методические рекомендации по

восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации». С учетом агрегатного состава асфальтобетонного гранулята подбирались смеси для слоев основания АГБС 16-К-О и АГБС 16-М-О.

В качестве объекта исследования в работе рассматривался асфальтобетонный гранулят (АГ) с содержанием остаточного битума 4,7%. Анализ гранулометрического состава АГ (0,063/31,5), продемонстрировал необходимость введения скелетного материала – гранитного щебня из карьера «Павловск Неруд» фр. 20-40 и фр.8-16. Для формирования структуры композита из асфальтобетонного гранулята использовалась битумная эмульсия ЭБДК М с содержанием вяжущего и эмульгатора 61% и индексом распада 273, а также портландцемент марки ЦЕМ I 32,5Н.

В соответствии с методикой, изложенной в ОС-568-р, на стадии подбора и дальнейших экспериментов образцы АГБ формовались прессованием под давлением. Переход в исследовании к ОДМ 218.6.1.005-2021, определил необходимость использования уплотнителя Маршалла для изготовления образцов диаметром 101,6±0,1 мм и высотой 63,5±2,5 мм. Использование уплотнителя Машалла, внесло изменения в изготовление образцов АГБ. Процесс изготовления образцов в соответствии с ОДМ должен завершаться в течение 2 часов после окончания перемешивания смеси. Подготовленная проба смеси помещалась в сборную форму и штыковалась 15 раз по периметру и 10 раз по внутренней части формы, после чего помещалась в уплотнитель и уплотнялась 50 ударами уплотнительного молота, после чего форма с образцом переворачивалась и закреплялась в держателе. Выполнялось повторение процедуры уплотнения с идентичным числом ударов уплотнительного молота. По окончании уплотнения, форма разбиралась и помещалась в устройство для извлечения образцов. У изготовленного образца оценивались его геометрические размеры и целостность. Нарушение одного из параметров – основание для отбраковки образца. Образец, соответствующий требованиям, отправлялся на хранение при нормальных условиях твердения.

В ходе эксперимента были получены оптимальные составы смесей. Их рецептуры представлены в табл. 1. Вода, с учетом отсутствия влажности в АГ, составляла 2,5%.

Таблица 1

Рецептуры АГБ смесей типов М и К

Вид смеси	Компонентный состав смеси, %				
	щебень фр.		асфальтогранулят	цемент ЦЕМ I 32,5Н	эмульсия ЭБДК М
	20-40	8-16			
АГБ М	19,0		81,0	3,2	-
АГБ К				2,7	2
АГБС 16-М-О		20,0	80,0	3,3	
АГБС 16-К-О				2,5	2,5

Изготовленные образцы твердели в соответствии с рекомендациями нормативных документов. После чего, часть образцов, изготовленных по методике ОС-568-р, испытывалась в виде цилиндров, вторая часть образцов подверглась распилу в призмы.

Изготовленные образцы-призмы тестировали на предел прочности на сжатие при температуре +20 °С, при температуре +20 °С после 10 циклов замораживания-оттаивания, растяжение при -10 °С. В процессе испытания на растяжение измеряли деформацию (прогиб) и работу, прилагаемую к образцу до его разрушения.

Оценка жесткости композитов выполнялась в соответствии с методикой EN 12697-26 «Смеси асфальтобетонные. Методы испытаний горячих асфальтобетонных смесей. Часть 26. Жесткость» (SIST EN 12697-26:2012 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness). Сравнительному анализу подверглись образцы из асфальтобетонной смеси и два вида асфальтогранулобетонной смеси типов М и К.

В ходе эксперимента к образцам прикладывалась синусоидальная нагрузка с частотой 10 Гц по схеме растяжения при расколе. В процессе тестирования выполнялось измерение вертикальных и горизонтальных деформаций образца при температуре испытания (-10, +20, +50 °С). На основе полученных данных был рассчитана жесткость

образцов. Началу испытаний предшествовало изготовление образцов шайб диаметром 100 мм и высотой (50 ± 1) мм при помощи вращательного уплотнителя Соорег. Эксперимент начинали с низкой температуры (-10°C) и постепенно переходили к высокой ($+20, +50^{\circ}\text{C}$).

После исследования индивидуальных характеристик дорожно-строительных композитов: АГБ типа М, АГБ типа К и асфальтобетона типа Б, были изготовлены двухслойные образцы цилиндры и плиты, имитирующие расположение слоев из материала в конструкции дорожной одежды: АГБ типа М + асфальтобетон, АГБ типа К + асфальтобетон, а также образцы плиты. Образцы плиты размером 260×320 мм изготавливались на секторном уплотнителе InfraTest 20-4030.

Через 7 суток на ранее изготовленные образцы АГБ формировали второй слой из асфальтобетона типа Б. Из сборных образцов цилиндров и плит в возрасте 8 суток выпиливались образцы-призмы, размером $70 \times 70 \times 150$ мм, которые были разделены на 2 серии. Призмы из цилиндров испытывались на изгиб (рис. 1) для оценки характера разрушения между слоями. Центром приложения растягивающей нагрузки принималась линия сопряжения слоев. Призмы из плит тестировались на изгиб с приложением растягивающей нагрузки по центру образца и фиксацией деформаций. Первые серии испытывались при температуре $+20^{\circ}\text{C}$, вторые серии подвергались попеременному замораживанию-оттаиванию, после чего испытывались при этой же температуре.



Образцы до испытания

Образцы после испытания

АГБ типа К

АГБ типа М

Рис. 1. Сборные двухслойные образцы-призмы из АГБ-смесей и асфальтобетона
(иллюстрация авторов)

Fig. 1. Prefabricated two-layer samples-prisms made of AGB mixtures and asphalt concrete
(illustration by the authors)

Образцы изготовленные по ОДМ 218.6.1.005-2021 испытывались по стандартным методикам, изложенным в нормативе: предел прочности при непрямом растяжении при температурах 20 и 40°C в возрасте 7 суток, . предел прочности при непрямом растяжении при температурах 20°C в возрасте 28 суток, водостойкость и длительная водостойкость.

3. Результаты и обсуждения

Изготовленные по методике ОС-568-р образцы из АГБ-смесей в возрасте 7 суток испытывали в соответствии с методологией изложенной выше. Так как в дорожной конструкции слой из асфальтогранулобетона работает, зачастую, совместно со слоями из асфальтобетона, представляло интерес изучение при идентичных условиях поведение и асфальтобетона. Полученные результаты представлены в табл.2.

Таблица 2

Показатели свойств изучаемых материалов

Показатель	Вид композита		
	АГБ типа К	АГБ типа М	асфальтобетон типа Б
Предел прочности на изгиб, МПа при температуре 0 °С	3,21	2,71	3,30
Деформация образца в момент разрушения, мм	1,41	0,85	1,45
Предел прочности при растяжении при расколе, температура испытания -10 °С, МПа	2,79	2,00	4,39
Деформация, мм	1,28	0,52	1,62
Работа, Дж	7210	2305	5688
Предел прочности при сжатии при температуре +20°С	3,84	2,71	3,96
Предел прочности при сжатии при температуре +20°С после 10 циклов замораживания-оттаивания	2,34	1,23	3,84
К морозостойкости	0,61	0,45	0,97

В процессе испытания образцов на растяжение измеряли его деформацию (прогиб) и работу, которую было необходимо приложить к образцу до его разрушения, (рис.2).

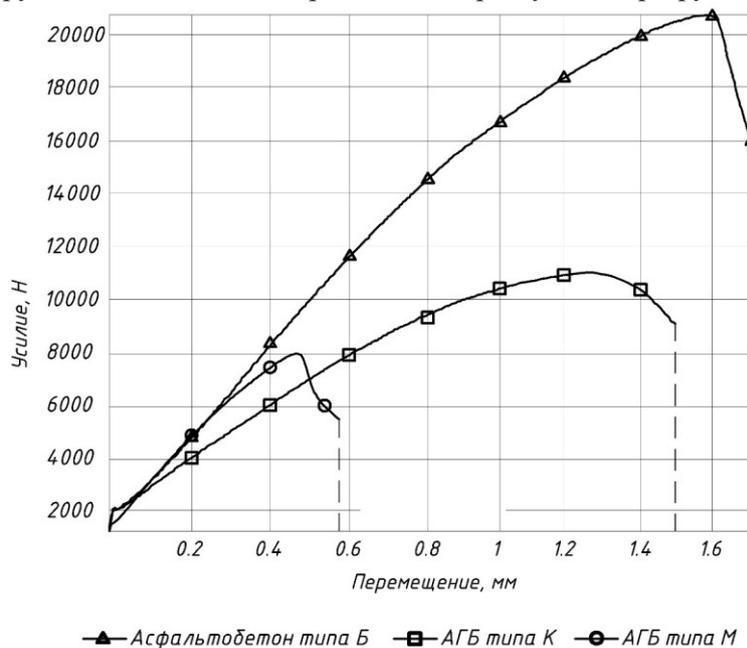


Рис. 2. Деформация образцов в момент разрушения при температуре - 10°С (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Deformation sample at the destruction moment at temperature - 10°С (illustration by the authors)

В соответствии с полученными данными, (рис.2), серии образцов из АГБ типа М характерно хрупкое разрушение с низкой способностью к релаксации напряжений. Наблюдается стремительный набор прочности, и падение ветви графика, что может косвенно свидетельствовать о возможности резкого отказа несущей способности конструктива, выполненного из такого материала. В пользу выдвинутого предположения свидетельствует и характер разрушения призм в момент испытания. Для образцов из АГБ типа М наблюдается широкое раскрытие трещины при испытании на изгиб, в то время как образец типа К более длительное время способен к сопротивлению разрушающему напряжению. При этом ветвь графика после разрушения характеризуется пологими очертаниями, позволяющими предположить склонность конструктива из АГБ типа К к релаксации напряжений.

Известно, что срок службы асфальтобетонных покрытий определяется также деформативными и теплофизическими показателями покрытия и основания. Чем больше различаются их прочностные характеристики и линейное температурное расширение, тем хуже совместная работа под действием нагрузок.

Сопоставительный анализ лабораторных моделей конструкции дорожной одежды состоящих из пар композитов (табл. 2): «АГБ типа М + асфальтобетон» (пара 1) и «АГБ типа К + асфальтобетон» (пара 2) продемонстрировал, что предел прочности на изгиб при температуре 0 °С и деформация образца в момент разрушения для пары 2 максимально близки и лежат в диапазоне погрешности измерения. Иная картина наблюдается при сопоставлении пары 1: разница прочностных характеристик образцов из АГБ типа М и асфальтобетона составила порядка 20%, а деформации более 40% с понижением.

Определение предела прочности при растяжении при расколе при температуре -10 °С, продемонстрировало, значительную разницу в величине показателя для образцов АГБ типа М и асфальтобетона. Для пары АГБ типа К и асфальтобетона это различие в конструктиве менее выражено. Однако наиболее важными показателями с точки зрения обеспечения единства работы слоев конструкции на изгиб и растяжение-сжатие является деформативность слоев. В случае пары 1 деформации (прогиб) композитов при -10 °С отличаются между собой более чем в 3 раза.

Интерес представляет коэффициент морозостойкости после 10 циклов замораживания-оттаивания сравниваемых композитов: для АГБ типа М этот показатель более чем в 2 раза меньше относительно асфальтобетона и на 35% АГБ типа К.

Таким образом, на данном этапе при оценке физико-механических характеристик АГБ типа К отличается рядом преимуществ. Есть мнение [17], что композитам, выполненным на минеральных вяжущих, характерны изменения размеров и форм, выражающиеся в горизонтальных и вертикальных перемещениях. Далее приведены данные, (табл. 3) по параметру жесткости композитов, который характеризует способность материала сопротивляться образованию деформаций и может являться индикатором перспективы совместной работы композитов в слоях дорожной одежды.

Таблица 3

Показатели жесткости образцов шайб

Температура испытания, °С	Жесткость образцов-шайб, изготовленных из различных композитов, МПа		
	АГБ типа К	АГБ типа М	асфальтобетон
50	550	3530	440
20	2040	5370	1970
-10	11700	13560	19140

Оценивалось влияние температур испытания и вида применяемого вяжущего в композите на его жесткость.

Очевидно, чем выше жесткость, тем менее материал подвержен деформации. С этой позиции АГБ типа К является предпочтительным. Однако, для совместной работы слоев дорожной одежды, важен не принцип максимальности единичных значений в конструктивном слое, а возможность совместной работы слоев. Подобный подход определяет интерес к паре «АГБ типа К и асфальтобетон», ввиду близости величин жесткости композитов в диапазоне рассматриваемых температур.

Сравнительный анализ исследуемых композитов по деформативным показателям, прочностям на изгиб и сжатие, в соответствии с табл. 2 и 3, продемонстрировал, что АГБ типа К и асфальтобетон типа Б имеют большее сходство, чем АГБ типа М, что в перспективе должно обеспечить эффективную совместную работу в конструкции дорожной одежды.

Тестирование сборных образцов-призм подтвердило правомерность выдвинутого предположения. Как видно, (рис.1), в случае испытания конструкции «АГБ типа К + асфальтобетон» разрушение идет по линии сопряжения слоев в виду их равнопрочности и близости деформативных характеристик. При испытании конструкции «АГБ типа М + асфальтобетон» разрушение идет по малопрочному материалу, в рассматриваемом случае

- асфальтогранулобетону на минеральном вяжущем, плохо воспринимающем, в виду жесткости, растягивающие напряжения.

Результаты по исследованию образцов-призм из плит представлены в табл.4.

Таблица 4

Показатели свойств сборных образцов «АГБ + асфальтобетон»

Рассматриваемые конструкции	Предел прочности на изгиб при температуре 20 °С, МПа	Деформация образца в момент разрушения, мм
АГБ типа М + асфальтобетон (пара 1)	2,70	0,49
АГБ типа К + асфальтобетон (пара 2)	3,04	1,40
АГБ типа М + асфальтобетон после замораживания и оттаивания	2,33	0,41
АГБ типа К + асфальтобетон после замораживания и оттаивания	2,80	1,38

Данные табл. 4 дублируют тренд изложенный в табл. 3. Очевидно, что слой из АГБ типа М являясь более жестким и малопрочным при изгибающих нагрузках лимитирует прогиб общей конструкции.

Реализация второй части эксперимента, выполненная по методологии ОДМ 218.6.1.005-2021, изложена в табл.5.

Таблица 5

Физико-механические показатели образцов, изготовленных из АГБС16-О

Наименование показателя	Значение показателей для АГБС О			
	требуемые		фактические	
	М	К	М	К
Водостойкость, не менее	0,50	0,50	0,50	0,74
Длительная водостойкость	-	-	0,39	0,56
Предел прочности при непрямом растяжении, МПа, при температуре 20 °С				
	0,30	0,30	0,44	0,58
	0,25	0,20	0,43	0,45
Предел прочности при непрямом растяжении, при температуре 20 °С в возрасте 28 суток, МПа, не более	1,2	1,2	1,16	0,89

Ожидаемо, показатели свойств композитов, выполненных на комплексном вяжущем, выше. И дублируют данные, полученные ранее, (табл. 2). В частности, этот тренд проявляется при анализе предела прочности композитов при непрямом растяжении, при температуре 20 °С в возрасте 28 суток. Данные табл. 5 демонстрируют, что АГБС - О М более прочный (жесткий) относительно образцов, выполненных на комплексном вяжущем. Примечательна динамика изменения водостойкости АГБ: образцы изготовленные на вяжущем типа К продемонстрировали большую коррозионную стойкость относительно серии изготовленной только с использованием цемента (тип М). Очевидно, это связано с тем, что для АГБ М для формирования прочной и устойчивой структуры требуется больше времени. Полученные данные, также согласуются с выводами, сделанными авторами [18], в соответствии с которыми требуется внесение специальных добавок, нацеленных на создание плотных и водостойких структур в асфальтогранулобетонах.

4 Заключение

Анализ полученных данных показал, что независимо от используемой методологии подбора и испытания асфальтогранулобетон с использованием комплексного вяжущего (типа К) отличается рядом преимуществ перед композитами, выполненными с использованием только цемента (тип М). Установлено, что прочностные характеристики, особенно на изгиб, и деформация образцов в диапазоне исследуемых температур для АГБ типа К и асфальтобетона типа Б максимально близки и лежат в диапазоне погрешности измерения. Для АГБ типа М разница прочностных характеристик, относительно

асфальтобетона, составила порядка 20%, а деформации более 40%. Коэффициент морозостойкости АГБ типа М после 10 циклов замораживания-оттаивания отличается от данных для асфальтобетона более чем в 2 раза в сторону понижения и на 35% меньше чем у АГБ типа К. Исследование образцов АГБ типа М, полученных посредством уплотнителя Маршалла, продемонстрировали недостаточную стойкость к воздействию воды. Таким образом, наилучшей совместной работой характеризуются сборные конструкции, выполненные из асфальтогранулобетона типа К и асфальтобетона в виду близости прочностных и деформативных характеристик в широком диапазоне температур, что закономерно с позиции закона «сродства структур». Для обеспечения показателей водо- и морозостойкости составы асфальтогранулобетона типа М требуют корректировки специальными добавками. В связи с этим, дальнейшие исследования будут направлены на модификацию составов добавками ПАВ и исследование холодных органоминеральных смесей (ОМС).

Список литературы/ References

1. Шукуров М. М., Нурдинов М. А., Солиев Б. А., Исмоилов Р. И. Дорожно-транспортный комплекс, и их воздействие на окружающую среду // ORIENSS. 2021. № 4. С. 689–696. [Shukurov M. M., Nurdinov M. A., Soliev B. A., Ismoilov R. I. Road transport complex and their impact on the environment // ORIENSS. 2021. No. 4. P. 689–696.]
2. Иванов Д. А., Михайлов А. В. Экология дорожного строительства: Баланс развития инфраструктуры и охраны окружающей среды // Вестник науки. 2023. № 6 (63). С. 852–857. [Ivanov D. A., Mikhailov A. V. Ecology of road construction: Balance of infrastructure development and environmental protection // Bulletin of Science. 2023. No. 6 (63). P. 852–857.]
3. Салихова Э. В., Турсунбаева Д. И. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду // Академическая публицистика. 2022. № 6-1. С. 171–174. [Salikhova E.V., Tursunbaeva D.I. The influence of automobile transport on the environment // Academic journalism. 2022. No. 6-1. P. 171–174.]
4. Zou T. Development Status and Future Prospects of New Construction and Decoration Materials in China // Building Materials and Decoration. 2020. No. 5. P. 52–53.
5. Vdovin E., Stroganov V., Konovalov N. Modification of road soil cement with activated fillers // Proceedings of EECE 2020. Energy, Environmental and Construction Engineering. Cham. 2021. P. 335–345. DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7_33].
6. Доля дорог, не отвечающих нормативным требованиям. Статистические данные. URL: <https://rosavtdor.gov.ru/> (дата обращения: 25.01.2024) [Proportion of roads that do not meet regulatory requirements. Statistical data. URL: <https://rosavtdor.gov.ru/> (reference date: 01/25/2024)].
7. Буданова Е. С., Ярмолинский В. А. Холодный ресайклинг. Повышение эффективности использования на территории РФ // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. № 2. С. 54–67. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54. [Budanova E. S., Yarmolinsky V. A. Cold recycling. Increasing the efficiency of use on the territory of the Russian Federation // Smart composites in construction. 2022. Vol. 3. No. 2. P. 54–67. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54.]
8. Mao N. Investigation of the Commercial Potential of Emulsified Asphalt Cold In-Place Recycling Based on SWOT Analysis // Open Journal of Business and Management. 2023. Vol. 11. No. 6. P. 3135–3151. DOI: 10.4236/ojbm.2023.116172.
9. Ayan V., Omer J. R., Azadani S. M. N., Limbachiya M. C. and Khavandi A. Water Absorption Study in Recycled Aggregates for Use as Pavement Material // Open Access Library Journal. 2014. Vol. 1. No. 6. P. 1–10. DOI: 10.4236/oalib.1100605.
10. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 10. С. 1241–1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257 [Lesovik V.S., Fomina E.V. The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1241-1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257]

11. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л., Толстой А.Д., Володченко А.А. Средство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего // Строительные материалы. 2015. № 9. С. 18–22 [Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Chulkova I.L., Tolstoy A.D., Volodchenko A.A. Affinity of structures as a theoretical basis for designing composites of the future. Construction Materials. 2015; № 9.P.18-22.].
12. Акимов И. Экологичное строительство: как девелоперы сохраняют окружающую среду / Акимов И. [Электронный ресурс] // газета.ru : [сайт]. — URL: <https://www.gazeta.ru/business/2021/12/15/14317705.shtml> (дата обращения: 25.01.2024). [Akimov I. Eco-friendly construction: how developers preserve the environment / Akimov I. [Electronic resource] // newspaper.ru: [site]. — URL: <https://www.gazeta.ru/business/2021/12/15/14317705.shtml> (reference date: 01/25/2024).].
13. El-Hmrawey S., El-Maaty A.E.A. and Elmohr A.I. Durability of Hot Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavements // Open Access Library Journal. 2015. Vol. 2. No. 5. P. 1-18. DOI: 10.4236/oalib.1101508.
14. Долинский Я. А., Свиридов В. Л., Соловьев А. С. Оптимизация составов асфальтогранулобетонных смесей при ремонте автомобильных дорог по методу холодной регенерации : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Омск, 2021. С. 647–654. [Dolinsky Ya. A., Sviridov V. L., Solovyov A. S. Optimization of the composition of asphalt granuloconcrete mixtures during the repair of highways using the cold regeneration method: collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "SibADI" / Siberian State Automobile and Highway University (SibADI). Omsk, 2021. P. 647–654.].
15. Еремин А. В., Курдюков Р. П. Определение рецепта приготовления асфальтогранулобетонной смеси // Высокие технологии в строительном комплексе. 2019. № 1. С. 37-41. [Eremin A.V., Kurdyukov R.P. Determination of a recipe for preparing an asphalt granuloconcrete mixture // High technologies in the construction complex. 2019. No. 1. P. 37-41.].
16. Измаилова Г. Г., Сивохина Е. С., Ельшибаев А. О. К вопросу применения битумной эмульсии в составе ресайклированного слоя // Вестник КазАТК. 2018. № 2 (105). С. 182–188. [Izmailova G. G., Sivokhina E. S., Elshibaev A. O. On the issue of using bitumen emulsion as part of a recycled layer // Vestnik KazATK. 2018. No. 2 (105). P. 182–188.].
17. Корочкин А. В. Теория расчёта жёсткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2017. 148 с. [Korochkin A.V. Theory of calculation of rigid road pavement with asphalt concrete pavement: textbook. M.: MADI, 2017. 148 p.]
18. Ярмолинский В.А., Буданова Е.С. Анализ эффективности применения различных видов вяжущих в асфальтогранулобетоне // Автомобильные дороги. 2023. № 8. С. 142–145. [Yarmolinsky V. A., Budanova E. S. Analysis of the effectiveness of the use of various types of binders in asphalt granulocrete // Highways. 2023. No. 8. P. 142–145].

Информация об авторах

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

E-mail: naukavs@mail.ru

Денисов Василий Петрович, кандидат технических наук, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

E-mail: wpdbel@mail.ru

Кабалин Максим Дмитриевич, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

E-mail: Maksipit13@gmail.com

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

E-mail: roruri@rambler.ru

Information about the authors

Valery St. Lesovik, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russian Federation.

E-mail: naukavs@mail.ru

Vasily P. Denisov, candidate of technical sciences, Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russian Federation.

E-mail: wpdbel@mail.ru

Maxim D. Kabalin, post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russian Federation.

E-mail: Maksipit13@gmail.com

Marina A. Vysotskaya, candidate of technical sciences, associate professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russian Federation.

E-mail: roruri@rambler.ru



УДК: 694.14

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.7

EDN: IAWOPI



Эффективность применения в соединениях деревянных конструкций клеенных резьбовых шайб

И.В. Ванин¹, М.В. Арискин¹

¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза, Российская Федерация

Аннотация. Первичные исследования показали, что в соединениях деревянных конструкций на резьбовых шайбах происходит преждевременное разрушение клеевого шва и отрыв шайб от деревянного элемента, вследствие действия усилий, направленных из плоскости шайб. Данные усилия предложено компенсировать с помощью дополнительного обжатия узла соединения накладками, плотно прилегающими к соединенным элементам узла. Цель исследования – изучение работы соединения деревянных конструкций на клеенных резьбовых шайбах при обжатии узла стальными накладками. Задачи исследования - провести экспериментальное исследование серий образцов для определения разрушающих нагрузок и предельных деформаций, исследовать характер разрушения образцов соединения, определить целесообразность применения данного вида соединения в деревянных конструкциях.

Результаты. В целях исследования характера работы рассматриваемого соединения проведены экспериментальные исследования серии образцов. Определены разрушающие нагрузки, построены графики деформаций. Исследованы факторы, влияющие на разрушающую нагрузку и механизм разрушения образцов, проведен анализ эффективности применения альтернативных способов восприятия распора шайб в узле соединения.

Выводы. Испытания показали общую неэффективность обжатия узла соединения стальными накладками. Так как другие способы восприятия распора в шайбах приведут к значительному увеличению сложности изготовления и сборки соединения, сделан вывод о неэффективности применения клеенных резьбовых шайб в соединениях деревянных конструкций. Анализ результатов исследований выявил возможность применения завинчиваемых резьбовых шайб без применения клеевой композиции, что значительно сократит время изготовления конструкции.

Ключевые слова: соединения деревянных конструкций, клеенная резьбовая шайба, распор шайб, обжатие накладками, разрушающая нагрузка

Для цитирования: Ванин И.В., Арискин М.В. Эффективность применения в соединениях деревянных конструкций клеенных резьбовых шайб // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 63-70, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.7, EDN: IAWOPI

The effectiveness of the use of glued threaded washers in the joints of wooden structures

I.V. Vanin¹, M.V. Ariskin¹

¹Penza State University of Architecture and Construction,
Penza, Russian Federation

Abstract. Primary studies have shown that in the joints of wooden structures on threaded washers premature destruction of the adhesive seam occurs and the washers detach from the wooden element, due to the action of forces directed from the plane of the washers. It is proposed to compensate for these forces by additional compression of the junction node with

overlays that are tightly adjacent to the connected elements of the node. The purpose of the research is to study the work of connecting wooden structures on glued threaded washers when compressing a node with steel linings. The objectives of the study are to conduct an experimental study of a series of samples to determine destructive loads and extreme deformations, to investigate the nature of the destruction of joint samples, to determine the feasibility of using this type of joint in wooden structures.

Results. In order to study the nature of the work of the joint in question, experimental studies of a series of samples were carried out. Destructive loads are determined, deformation graphs are constructed. The factors influencing the destructive load and the mechanism of destruction of samples are investigated, the analysis of the effectiveness of the use of alternative methods of perception of the expansion of washers in the junction node is carried out.

Conclusions. Tests have shown the general inefficiency of compression of the junction with steel plates. Since other ways of perceiving the spacer in washers will lead to a significant increase in the complexity of manufacturing and assembling the joint, it is concluded that the use of glued threaded washers in joints of wooden structures is ineffective. The analysis of the research results revealed the possibility of using screw-on threaded washers without the use of an adhesive composition, which will significantly reduce the manufacturing time of the structure.

Keywords: joints of wooden structures, glued threaded washer, washers spacer, compression by pads, destructive load

For citation: Vanin I.V., Ariskin M.V. The effectiveness of the use of glued threaded washers in the joints of wooden structures // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 63-70, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.7, EDN: IAWOPI

1. Введение

Одним из актуальных направлений изучения строительных конструкций является исследование деревянных конструкций [1, 2] и их узловых соединений [3-5].

Древесина является анизотропным возобновляемым материалом, обладающим высокой прочностью и доступностью. Учитывая данные свойства, а также то, что древесина является экологически чистым и эстетичным материалом, деревянные конструкции широко используются в современном строительстве [6-8].

Широкое применение в разнообразных конструкциях в совокупности с анизотропностью материала привели к тому, что деревянные элементы в структурах зданий и сооружений должны спланироваться определенным образом в зависимости от типа конструкции, угла передачи усилий между элементами, направления волокон древесины и условий эксплуатации. В результате, в настоящее время имеется большое разнообразие соединений деревянных конструкций [9-11].

Одним из перспективных соединений деревянных конструкций является соединение с применением вклеенных стальных шайб (далее – соединение ВШ) [12]. В данной работе рассмотрена возможность усиления данного соединения путем нанесения на внутренние диаметры стальных шайб и стяжную шпильку резьбы, что должно привести к повышению жесткости соединения [13].

Соединения ВШ отличаются высокой прочностью, надежностью, технологичностью, являются сборно-разборными [12]. Однако в ряде случаев (эксцентриситет при передаче нагрузки, погрешность при вклеивании шайбы, порок древесины) возможна неравномерная передача усилий от шпильки на шайбы и, как следствие, неравномерная передача усилий от шайб на древесину, что приводит к снижению надежности и неравномерным деформациям конструкции.

При нанесении резьбы на шпильку и внутренние диаметры шайб обеспечивается совместная работа обеих шайб и шпильки за счет монолитного сцепления спиральных поверхностей данных элементов.

Таким образом, все конструктивные детали соединения ВШ (деревянный элемент, шайбы, шпилька) монолитно сопряжены между собой посредством клеевого и резьбового соединений, что приводит к повышению жесткости и надежности конструкции. Кроме

того, в случае соединения элементов через стальные накладки при полном затяжении стягивающих гаек значительно уменьшается изгибаемый пролет шпильки, что сохраняет ее от повреждений вследствие деформаций от внешних нагрузок.

В итоге, наличие резьбового соединения шпильки и шайб должно привести к значительному уменьшению деформаций соединения ВШ и увеличению его надежности. Вместе с тем, результаты исследований, приведенные в [13], показали, что усиление соединения ВШ резьбой не ведет к увеличению прочностных характеристик соединения, а, напротив, требует применения дополнительных конструктивных креплений для восприятия распора в шайбах.

Цель исследования – изучить работу соединения на клеенных резьбовых шайбах в условиях обжатия испытываемых образцов стальными накладками, воспринимающими распор шайб в узле.

Для достижения указанной цели необходимо провести экспериментальные испытания серии образцов с определением разрушающих нагрузок и предельных деформаций, исследовать характер разрушения испытываемых образцов, оценить возможность применения рассматриваемого соединения в деревянных конструкциях.

2. Материалы и методы

Для исследования соединения деревянных конструкций с применением клеенных резьбовых шайб (далее – соединение ВШР) были разработаны методика экспериментальных исследований, технология изготовления и проведены испытания серии образцов.

В методику экспериментальных исследований входят выбор параметров и материалов испытываемых образцов соединения ВШР, технология их изготовления, подбор испытательного и измерительного оборудования, определение порядка проведения эксперимента и получения результатов.

В качестве основного материала образцов выбрана древесина сосны 2-го сорта ввиду своей доступности и широкой области применения. Стальные элементы изготовлены из стали С255. Для вклеивания шайб в древесину применена клеевая композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20, обладающая невысокой себестоимостью и хорошей адгезией с древесиной и сталью, ввиду чего также активно применяется в строительстве.

Размеры образцов и диаметр шайб приняты, исходя из шага размещения шайб на деревянном элементе. Так, размеры деревянного образца равны 200х150х50 мм. Диаметр стальных шайб – 80 мм, толщина – 10 мм. Диаметр стяжной шпильки 20 мм.

Технология изготовления соединения ВШР включает в себя те же мероприятия, что и изготовление соединения ВШ [1, 4], но с учетом наличия резьбы на шайбах и шпильке. Резьба изготавливается с помощью токарно-фрезерного оборудования. В гнезда, предварительно выпиленные в деревянном элементе, поочередно вклеиваются стальные шайбы таким образом, чтобы совпал заход резьбы шпильки на обеих шайбах (рисунок 1).

Интервал между вклеиванием шайб составляет 1-2 дня и обусловлен застыванием эпоксидной смолы. После вклеивания шайб образцы выдерживались в течение 7 дней до достижения ими равновесной влажности древесины и набора прочности клеевого шва.

Затем образцы помещаются в испытательную установку.

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «ПГУАС». Для загрузки опытных образцов использовался гидравлический пресс П-500 со встроенным оборудованием для определения вертикальных перемещений. Данные о результатах исследований (вертикальная нагрузка, деформации) записываются в журнал испытаний.

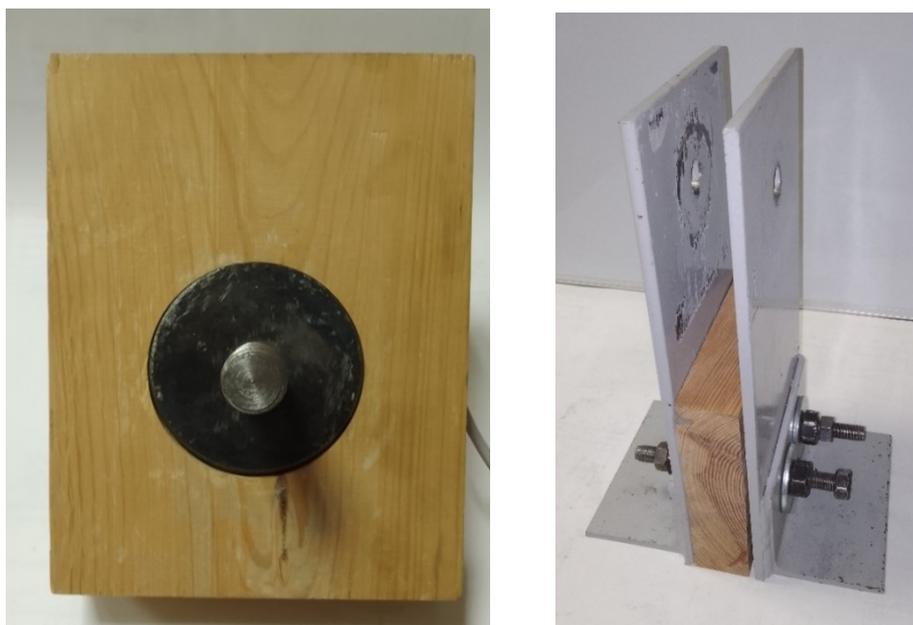


Рис. 1. Общий вид образца серии VShR 80-10 и стальных накладок (иллюстрация авторов)
Fig. 1. General view of a sample of the series of VShR 80-10 and steel linings (illustration by the authors)

Перед испытанием образец помещается в сборную стальную раму, имитирующую передачу усилий между элементами конструкции через стальные накладки. Кроме того, сборная рама позволяет дополнительно обжать образец, что должно устранить распор, возникающий в шайбах. Далее образец в стальной раме устанавливается под пресс, центрируется и обжимается до устранения зазора между образцом и верхним упором (рисунок 2).

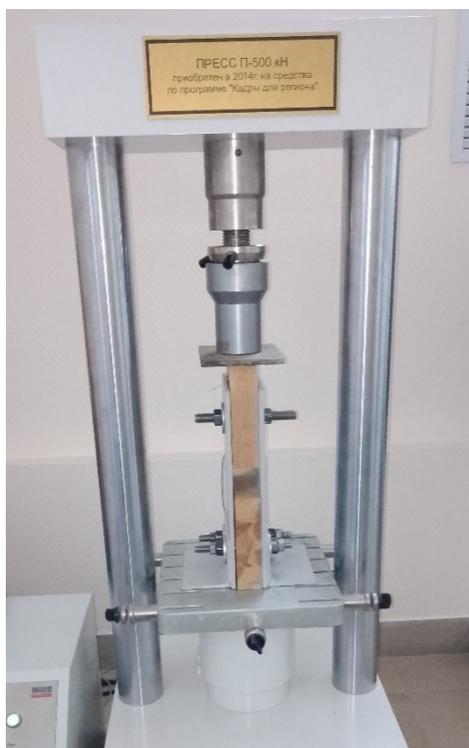


Рис. 2. Образец, готовый к испытанию (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Sample ready for testing (illustration by the authors)

Образцы испытываются воздействием кратковременной нагрузки при скорости нагружения 4 кН/мин до их разрушения. За разрушающую нагрузку принимается та, при которой значительно увеличивается рост деформаций при относительно небольшом увеличении вертикальной нагрузки.

3. Результаты и обсуждение

Разрушение образцов в ходе испытания происходило плавно, без резких щелчков в древесине вплоть до достижения разрушающей нагрузки. Вместе с тем, нагружение всех 3-х образцов сопровождалось постоянным похрустыванием, свидетельствующем о разрушении клевого шва, что, однако, не приводило к преждевременному разрушению всего образца. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов соединения ВШР

№ п/п	Марка образца	Разрушающая нагрузка, кН	Вертикальные перемещения, мм
1	ВШР-80-10-1	61,75	2,6
2	ВШР-80-10-2	63,77	1,27
3	ВШР-80-10-3	70,7	1,82

Также, по результатам испытаний построены графики деформаций образцов (Рисунок 3).

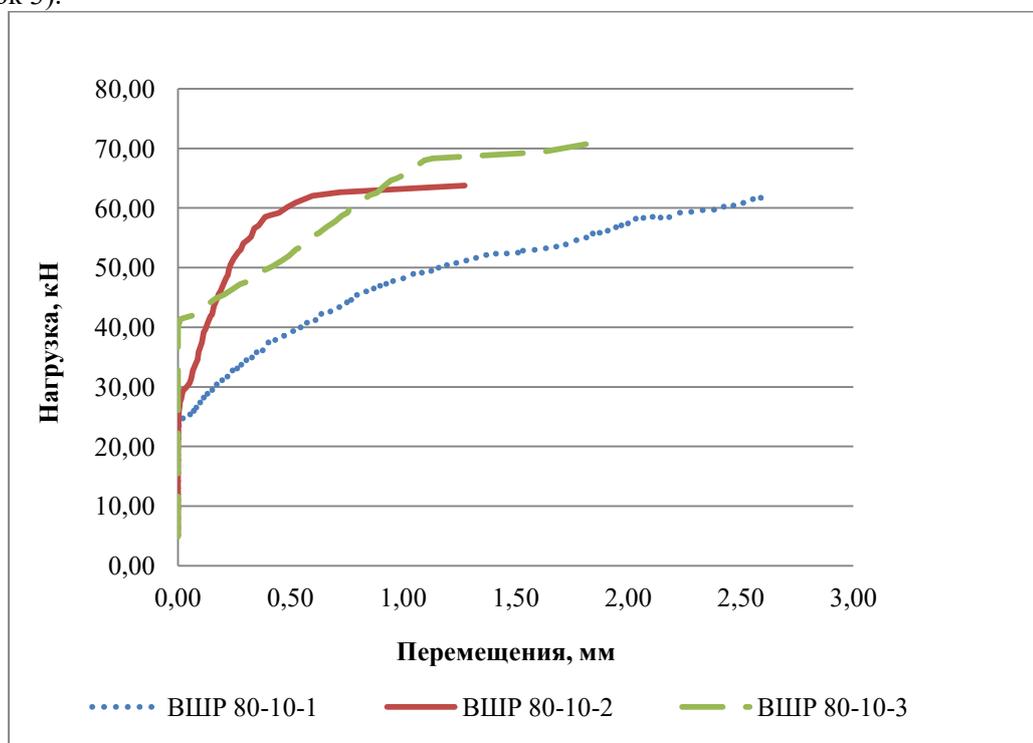


Рис. 3. Графики деформаций образцов серии ВШР 80-10 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Graphs of deformations of samples of the VShR 80-10 series (illustration by the authors)

Разрушение образцов произошло вследствие смятия древесины под торцами шайб, что возможно только после отрыва шайб от деревянного элемента. Как показали исследования [12, 14, 15] клеевая композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20 обладает высокой степенью адгезии, в результате чего отрыв шайбы от деревянного элемента происходит вследствие скалывания древесины под поверхностью шайбы. Однако, как видно из рисунка 4 смещение шайбы произошло без скалывания древесины под её поверхностью. Вместе с тем, осмотр клеевой прослойки позволяет сделать вывод о том, что под нижней половиной поверхности шайбы на клеевой шов действовали усилия, направленные из плоскости шва. Об этом говорит характерная сеть трещин на застывшей клеевой композиции (под нижней половиной шайбы).

Подобное явление объясняется тем, что шайбы монолитно связаны резьбой со шпилькой, которая в процессе нагружения изгибается. В соответствии с изгибом шпильки происходит поворот шайб и их постепенный отрыв от деревянного образца.

Образцы после испытаний представлены на рисунке 4.

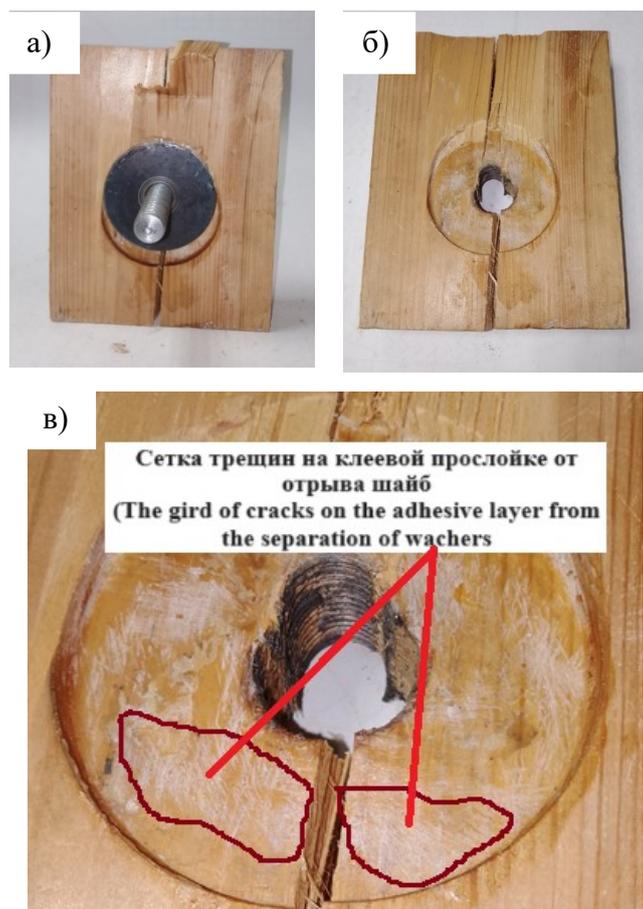


Рис. 4. Образцы после разрушения (иллюстрация авторов)

- а – общий вид разрушенного образца;
- б – деревянный элемент образца после разрушения;
- в – сетки трещин под клеенной шайбой

Fig. 4. Samples after destruction (illustration by the authors)

- a – a general view of the destroyed sample;
- b – a wooden element of the sample after destruction;
- c – a grid of cracks under the glued washer

В [13] было предложено решить данную проблему с помощью дополнительных конструктивных средств, обеспечивающих восприятие распора в шайбах. Наиболее рациональным решением является применение сборной рамы, которая дает возможность обжать образец и зафиксировать шайбы от их поворота. Вместе с тем, проведенное испытание серии ВШР 80-10 показало, что данных мероприятий для устранения распора в шайбах недостаточно. Применение других конструктивных средств (фиксация шайб нагелями, обоймами и т.п.) повлечет за собой серьезное снижение технологичности изготовления соединения.

Также, стоит отметить, что при вклеивании резьбовых шайб невозможно осуществить их затяжку. После разрушения клеевого шва усилия на деревянный элемент передаются только через ребра шайб. Затяжение шайб в образце может повлиять на несущую способность соединения, что подводит к рассмотрению варианта применения не вклеиваемых резьбовых шайб.

4. Заключение

Экспериментальное исследование соединения на вклеенных резьбовых шайбах на примере испытания образцов серии ВШР 80-10 показало, что комбинирование резьбового и клеевого соединений для фиксации стальных шайб и передачи нагрузок между элементами не ведет к увеличению жесткости и несущей способности соединения из-за преждевременного отрыва шайб от деревянного элемента вследствие распора. Кроме

того, вклеивание резьбовых шайб с обеспечением совпадения захода резьбы на обеих шайбах значительно снижает технологичность изготовления конструкции. В совокупности с применением дополнительных средств для восприятия распора трудоемкость сборки рассматриваемого соединения значительно увеличивается.

Таким образом, применение соединения деревянных конструкций на вклеенных резьбовых шайбах является нецелесообразным. Вместе с тем, возможно рассмотреть применение соединения деревянных конструкций на резьбовых шайбах без применения клеевой композиции, прочность и жесткость которого планируется обеспечить за счет затяжения шайб. Кроме того замена вклеивания шайб их завинчиванием значительно снизит сроки изготовления конструкции.

Список литературы / References

1. Фурман, Е.А., Симонова, Я.Е. Строительство складов хранения угля и минеральных удобрений с применением большепролетных клееных деревянных конструкций // В сборнике: Инновации в деревянном строительстве. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург. - 2023. - С. 214-218. [Furman, E.A., Simonova, Y.E. Construction of coal and mineral fertilizer storage warehouses using large-span glued wooden structures // In the collection: Innovations in wooden construction. Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference. - St. Petersburg. - 2023. - P. 214-218.]
2. Сибен, А.В. Клеёные деревянные конструкции в строительстве: эффективность и проблемы применения // В сборнике: Новые технологии - нефтегазовому региону. Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В IV томах. – Тюмень. - 2022. - С. 180-183. [Siben, A.V. Glued wooden structures in construction: efficiency and application problems // In the collection: New technologies for the oil and gas region. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. In IV volumes. – Tyumen. - 2022. - P. 180-183.]
3. Koshcheev, A., Roshchina, S., Lukin, M., Vatin, N. Wood and Steel Rope: A Rational Combination in Floor Beams. // DOI 10.1007/978-3-030-85236-8_40.
4. Lukin, M., Chibrikin, D., Roshchina, S. Numerical studies of modified composite beams taking into account the physical nonlinearity of wood // News of higher educational institutions. Construction. – 2023. - № 5-19. DOI 10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19.
5. Orlov, A.O., Rimshin, V.I., Labudin, B.V., Melekhov, V.I., Kurbatov, V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings // ARPN Journal of engineering and applied sciences, vol. 13, № 11, 2018. P. 3851-3856.
6. Калашник Д.К., Мироненко О.В. Деревянная архитектура - тренд XXI века // Актуальные вопросы современной науки. - 2019. - № 4 (24). - С. 53-59. [Kalashnik D.K., Mironenko O.V. Wooden architecture - the trend of the XXI century // Current issues of modern science. - 2019. - № 4 (24). - P. 53-59.]
7. Švajlenka, J., Kozlovská, M. Factors Influencing the Sustainability of Wood-Based Constructions' Use from the Perspective of Users // Sustainability. – 2021. - № 13(23) - DOI 10.3390/su132312950.
8. Švajlenka, J., Maroušková, A. Preproduction of wooden buildings makes them a promising tool for carbon sequestration // Clean Technologies and Environmental Policy. -2023. - DOI 10.1007/s10098-023-02471-w.
9. Мартышкин, Д.О., Вдовин, В.М. Цельнодеревянные фермы с узловыми соединениями на вклеенных шайбах // в сборнике: Эффективные строительные конструкции: теория и практика. сборник статей XIX Международной научно-технической конференции. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. - 2019. - С. 29-33. [Martyshkin, D.O., Vdovin, V.M. Solid-wood trusses with nodal connections on glued washers // in the collection: Effective building structures: theory and practice. collection of articles of the XIX

- International Scientific and Technical Conference. Penza State University of Architecture and Construction. - 2019. - P. 29-33.]
10. Мухаев, А.И., Вдовин, В.М. Работа соединения на центровых клеенных кольцевых шпонках при передаче ими нагрузки под углом к волокнам древесины // Региональная архитектура и строительство. - 2012. - № 2. - С. 102-106. [Mukhaev, A.I., Vdovin, V.M. The work of the connection on the center glued ring dowels when they transfer the load at an angle to the wood fibers // Regional architecture and construction. - 2012. - No. 2. - P. 102-106.]
 11. Попов, Е.В., Лабудин, Б.В., Мелехов, В.И., Рощина, С.И., Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестник МГСУ – Москва, 2016. – №9. с. 35–50. [Popov, E.V., Labudin, B.V., Melekhov, V.I., Roshchina, S.I., Rimshin, V.I. Connections of elements of wooden structures on dowels and washers // Vestnik MGSU – Moscow, 2016. – No. 9. P. 35-50.]
 12. Арискин, М.В., Вдовин, В.М. Несущая способность соединений на клеенных шайбах при передаче усилий вдоль волокон древесины // Приволжский научный журнал. – 2009. - № 4. – С. 21-27. [Ariskin, M.V., Vdovin, V.M. Bearing capacity of joints on glued washers when transferring forces along wood fibers // Volga Scientific Journal. – 2009. - No. 4. – P. 21-27.]
 13. Ванин И.В., Арискин М.В. Соединение деревянных конструкций с применением клеенных стальных шайб с внутренней резьбой // Вестник НИЦ «Строительство». – 2022. - 35(4) – С. 30-39 [Vanin I.V., Ariskin M.V. Connection of wooden structures using glued steel washers with internal thread // Bulletin of SIC "Construction". – 2022. - 35(4) – P. 30-39]
 14. Строганов, В.Ф., Вдовин, Е.А., Строганов, И.В. Влияние строения гетероциклических мономеров на теплостойкость эпоксидных клеев // Клеи. Герметики. Технологии. - 2023. - № 4. - С. 22-25. [Stroganov, V.F., Vdovin, E.A., Stroganov, I.V. Influence of the structure of heterocyclic monomers on the heat resistance of epoxy adhesives // Glues. Sealants. Technologies. - 2023. - No. 4. - P. 22-25.]
 15. Хозин, В.Г., Гиздатуллин, А.Р., Боровских, И.В., Мирсаяпов, И.Т., Яруллин, Р.Р. Совместная работа эпоксидного композита и защитного покрытия с цементным бетоном в зоне их адгезионного контакта // Строительные материалы. - 2023. - № 4. - С. 24-31. [Khozin, V.G., Gizdatullin, A.R., Borovskikh, I.V., Mirsayapov, I.T., Yarullin, R.R. Joint work of epoxy composite and protective coating with cement concrete in the area of their adhesive contact // Building materials. - 2023. - No. 4. - P. 24-31.]

Информация об авторах

Ванин Илья Владимирович, аспирант, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация
E-mail: ya.vanin94@yandex.ru

Арискин Максим Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Российская Федерация
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Information about the authors

Ilya V. Vanin, Postgraduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation
E-mail: ya.vanin94@yandex.ru

Maxim V. Ariskin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.8
EDN: IJQESY



Сопротивление комбинированной (сталебетонной) балки

Илшат Т. Мирсаяпов¹, М.Н. Павлов¹, Р.Г. Гайнетдинов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Известные варианты поперечных сечений комбинированных балок, которые представлены в пособиях, статьях и патентах исследователей, имеющие свои достоинства и недостатки. Комбинированные (сталебетонные) балки с частичной заделкой в бетонную плиту мало исследованы, существует необходимость предварительной оценки несущей способности сечения, которое можно выполнить численными методами. Цель работы: исследование мало изученного варианта комбинированной (сталебетонной) балки. В связи с поставленной целью решены следующие задачи: описаны достоинства комбинированной (сталебетонной) балки с частичной заделкой стального двутавра в бетонную плиту и проведен анализ напряженно-деформированного состояния по нормальным сечениям.

Результаты. В работе описаны достоинства предложенного варианта комбинированной (сталебетонной) балки. Представлена модель, описывающая напряженно-деформированное состояние комбинированной (сталебетонной) балки по нормальным сечениям.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что предложенный вариант комбинированной (сталебетонной) балки с частичной заделкой стального двутавра в бетонную плиту, позволит увеличить несущую способность перекрытия, уменьшить затраты на строительные-монтажные работы и затраты на материалы.

Ключевые слова: сталебетонная балка, комбинированная балка

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Павлов М.Н., Гайнетдинов Р.Г. Сопротивление комбинированной (сталебетонной) балки // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 71-82, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.8, EDN: IJQESY

Resistance of a composite (steel-concrete) beam

Ishat T. Mirsayapov¹, M. N. Pavlov¹, R. G. Gainetdinov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Well-known variants of cross-sections of composite beams, which are presented in manuals, articles, patents of researchers, they have their advantages and disadvantages. Composite (steel-concrete) beams with partial embedding in a concrete slab have been studied little, that's why there is a need for a preliminary assessment of the bearing capacity of the section, which can be performed by numerical methods. The purpose of the work is to study a little-studied variant of a composite (steel-concrete) beam. In the connection with the purpose above the following tasks have been solved: to describe the advantages of a composite (steel-concrete) beam with partial embedding of a steel I-beam into a concrete slab and to analyze the stress-strain state according to normal sections.

Results. The paper presents the advantages of the proposed variant of a composite (steel-concrete) beam. A model describing the stress-strain state of a composite (steel-concrete) beam in normal sections is presented.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that the proposed version of a composite (steel-concrete) beam with partial embedding of a steel I-beam into a concrete slab will increase the bearing capacity of floors, reduce the cost of construction and installation work and material costs.

Keywords: steel concrete beam, composite beam.

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Pavlov M.N., Gainetdinov R.G. Resistance of a composite (steel-concrete) beam // News KGASU, 2024, № 1(67), p. 71-82, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.8, EDN: IJQESY

1. Введение

В последние десятилетия в России построено множество уникальных сооружений: Московский международный деловой центр «Москва-Сити» [1-3], спортивные объекты XXVII Всемирной летней Универсиаде и к Чемпионату мира по футболу 2018 г. [4-5]. Для подобных сооружений актуальны конструкции, которые могут быть использованы как большепролетные перекрытия. Наиболее популярные конструкции: металлические фермы, кессонные перекрытия, а также перекрытия, включающие в себя композитные (сталежелезобетонные) балки.

Изучение комбинированных (сталебетонных) балок актуально тем, что конструкция имеет множество преимуществ, например, бетонная плита эффективно работает на сжатие, а стальная балка на растяжение. К преимуществам комбинированных балок можно отнести, что они имеют хорошие прочностные и жесткостные показатели при тех же геометрических характеристиках.

Наиболее популярное сечение — это комбинированная (сталежелезобетонная) балка по стальному профилированному настилу [6-7]. В данном сечении железобетонная плита по профилированному листу опирается на верхнюю полку двутавра, совместная работа обеспечивается с помощью гибких упоров. При этом, как известно, в большинстве случаев по конструктивным требованиям невозможно расположить достаточное количество гибких упоров для обеспечения полной совместной работы железобетонной плиты и стальной балки.

Известна комбинированная (сталежелезобетонная) балка [8], в которой нижний пояс стальной балки заделан в железобетонную плиту. Недостатком данного сечения является, что железобетонная плита находится в растянутой зоне. Бетон не эффективно работает на растяжение, верхняя полка стальной балки находится в сжатой зоне. Возникает проблема с потерей устойчивости и требуется дополнительное раскрепление конструкции.

Наиболее близким сечением, к изучаемой балке, является композитное перекрытие из гнутого оцинкованного профиля без анкерных устройств, в котором верхняя полка П-образного профиля частично заделана в бетонную плиту [9-10]. Профиль полностью находится в растянутой зоне и на сжатие не работает. Поэтому часть сечения стального профиля выполняет роль жесткой арматуры в растянутой зоне железобетонной плиты. Такое размещение профиля создает максимальные напряжения сдвига по поверхности контакта. Предполагаемый участок отказа между профилем и бетонной плитой от растягивающих усилий. Ограничения пролета данного перекрытия 6-8 м. Балки располагаются с шагом 1,23 м.

Авторами предлагается сечение, где верхняя полка стальной балки заделана в бетонную плиту. При таком конструировании бетонная плита раскрепляет верхнюю полку стальной двутавровой балки и усиливает ее сжатую зону. Строительная высота сечения схожа с монолитной плитой перекрытия, но несущая способность комбинированной балки в составе перекрытия будет кратно выше.

Цель работы заключается в описании напряженно-деформированного состояния сечения.

Задачами исследования является:

- получить, описать и изобразить эпюры напряжений по нормальным сечениям на основе анализа численной модели;
- определить элемент отказа с учетом нелинейной диаграммы работы стали и бетона на основе анализа модели;

- определить несущую способность комбинированной (сталебетонной) балки;
- сравнить комбинированную (сталебетонную) балку с разной толщиной бетонной плиты. Определить критерии подбора толщины плиты.

2. Материалы и методы

В качестве исходных данных для исследования принято сечение на рис. 1, стальная балка прокатная 20Б1 из класса стали С245, которая верхней полкой заделана в бетонную плиту толщиной 60 мм класс бетона В25, армированная конструктивной сеткой диаметром 3 мм класс В500.

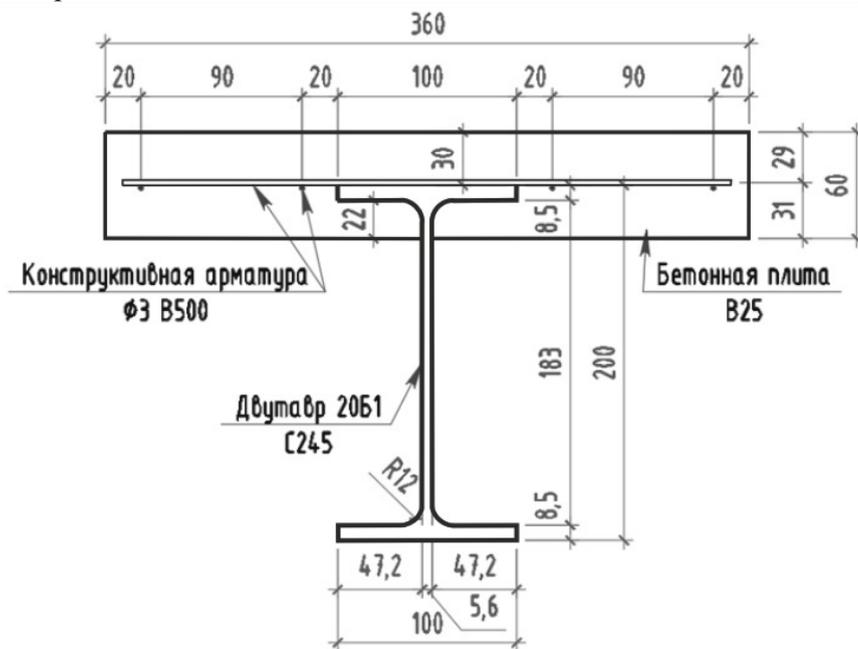


Рис. 1. Исследуемое сечение 1-1 (иллюстрация авторов)
Fig. 1. The section under study 1-1 (illustration by the authors)

Расчетная схема на рис. 2, представляет собой балку, опертую на две опоры шарнирно. Нагрузка приложена равномерно по всей длине балки.

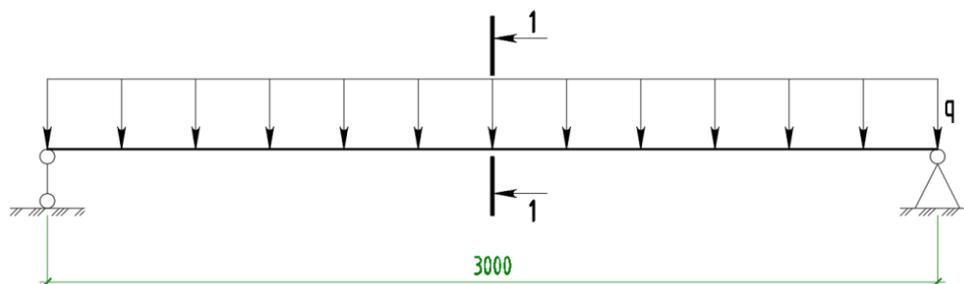


Рис. 2. Расчетная схема исследуемого сечения (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Calculation scheme of the section under study (illustration by the authors)

Расчетная модель балки представлена на рис. 3, которая была собрана в SpaceClaim. Конечный элемент типа «solid 185/186» применен для стальной балки бетонной плиты, закладных деталей и опор. Для арматуры конечный элемент типа «Beam 188», который преобразован в тип reinforcement в workbench.

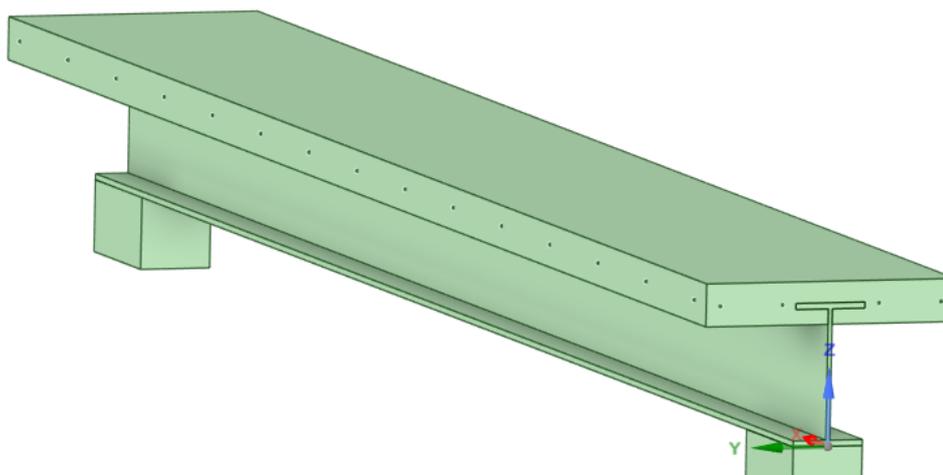


Рис. 3. Расчетная модель балки в SpaceClaim (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Calculation model in SpaceClaim (illustration by the authors)

Характеристики материалов заданы нелинейными. Для бетона принята экспоненциальная диаграмма работы в соответствии с приложением Г СП 63.13330.2018. Принята теория прочности и пластичности бетона Менетри-Виллама (Menetrey-Willam), которая хорошо описывает поведение натуральных образцов бетона. Для учета трещин в растянутой зоне используется модель разупрочнения (деградации) бетона HSD 6 (Hardening-Softening and Dilatation). Заданы характеристики бетона В25. Нормативные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Заданные характеристики бетона в Ansys Workbench

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	2400	кг/м ³
2	Условный модуль упругости бетона (Young's Modulus)	30000	МПа
3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,2	-
Menetrey-Willam Base (Менетри-Виллам базовый параметры)			
4	Прочность бетона при одноосном сжатии (Uniaxial Compressive Strength)	18,5	МПа
5	Прочность бетона при одноосном растяжении (Uniaxial Tensile Strength)	1,55	МПа
6	Прочность бетона при двухосном сжатии (Biaxial Compressive Strength)	22,2	МПа
7	Угол дилатации бетона при сдвиге (Dilatancy Angle)	13	град.
Softening HSD 6 (разупрочнение по экспоненциальному закону)			
8	Пластические относительные деформации бетона, соответствующие вершине диаграммы (Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength)	0,0015008	мм/мм
9	Предельные пластические относительные деформации, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0,0028584	мм/мм
10	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в конце упругого участка диаграммы (Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening)	0,6	-

Окончание таблицы 1

11	Относительные сжимающие напряжения в бетоне, соответствующие предельным относительным деформациям, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0,85	-
12	Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии полного разрушения (Residual Compressive Relative Stress)	0,2	-
13	Внутренняя энергия деформирования единичной площадки при растяжении (Mode 1 Area Specific Fracture Energy)	155,55	Н/м ¹
14	Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне, соответствующие трещинообразованию (Residual Tensile Relative Stress)	0,1	-

Для стали принята кусочно-линейная диаграмма в соответствии с приложением В1 СП 16.13330.2017. Заданы характеристики стали С245. Нормативные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Заданные характеристики стали в Ansys Workbench

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	7850	кг/м ³
2	Условный модуль упругости стали (Young's Modulus)	$2,06 \cdot 10^5$	МПа
3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0,3	-
Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали)			
6	Параметры в таблице (деформации)	Значение: 0	мм/мм
		Значение равняется пределу упругой работы диаграммы: $\varepsilon_{пц} = 0,00098$	мм/мм
		Значение равняется пределу упруго-пластичной работы диаграммы: $\varepsilon_{нт} = 0,0020825$	мм/мм
		Значение равняется пределу площадки текучести диаграммы: $\varepsilon_{кт} = 0,01715$	мм/мм
		Значение равняется пределу площадки самоупрочнение диаграммы: $\varepsilon_{в} = 0,17346$	мм/мм
7	Параметры в таблице (напряжения)	Значение: $0,1^{10}$	МПа
		Значение равняется пределу текучести стали: 196	МПа
		Значение равняется началу текучести стали: 245	МПа
		Значение равняется текучести стали: 245	МПа
		Значение равняется временному сопротивлению стали: 405	МПа

Для арматуры принята линейная работа стали, так как в данном случае арматура осуществляет роль конструктивной и в расчете не учитывается. Для опор также принята линейная работа стали, которая имитирует стальные опоры. В Workbench заданы следующие контакты: 1) между опорой 1 и нижней полкой двутавра: «Rough»,

данный контакт моделирует шарнирно-неподвижную опору; 2) между опорой 2 и нижней полкой двутавра: «Frictional» с коэффициентом 0,5, данный контакт моделирует шарнирно-подвижную опору; 3) между бетонной плитой и частью двутавра, которая заделана в плиту: «Frictional» с коэффициентом 0,5, которая принята на основе испытаний [11], которая моделирует трение между сталью и бетоном. Заданы следующие граничные условия: 1) на нижнюю поверхность опор «Fixed Support», которая имитирует жесткую заделку; 2) на боковые грани бетонной плиты поперек балки задан «Displacement», которая ограничивает перемещение по Y. Нагрузка задана на всю поверхность плиты: «Force», значение 300000 N.

3. Результаты и обсуждение

Для анализа полученных результатов необходимо выведены следующие значения: 1) для бетона и стали Normal Stress (нормальные напряжения); Equivalent Total Strain (относительные деформации); 2) Для оценки прогибов Total Deformation (полные деформации); для определения несущей способности Force Reaction (опорная реакция).

Отказ сечения зафиксирован на 0,91994 секунды, несущая способность составила $P_{ult} = 300000 \cdot 0,91994 = 275982 \text{ N} = 28,14 \text{ т}$. Общие деформации на рис. 4. В момент отказа сечения составляет 33,075 мм, что превышает требования, представленные в приложение Д СП 20.13330.2016. Для пролета 3 метра максимальный прогиб составляет $-L/150=20 \text{ мм}$.

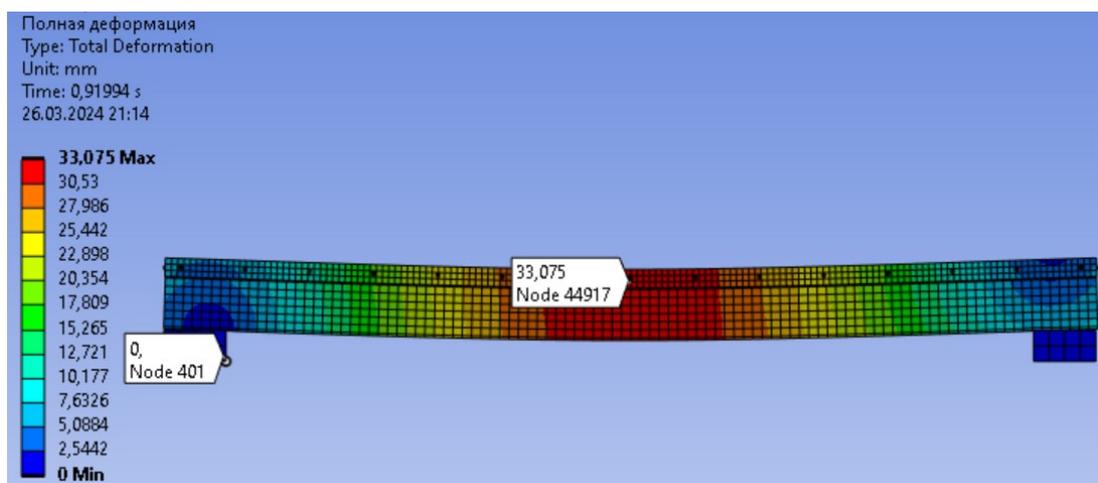


Рис. 4. Прогиб балки (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Deflection of the beam (illustration by the authors)

Нормальные напряжения в бетонной плите представлены на рис. 5. В момент отказа сечения составляет 30,12 МПа. Локально превышено сопротивление бетона на сжатие $R_{b,n}=18,5 \text{ МПа}$. Можно заметить положительные значения, а именно растяжение бетона со значением 1,54 МПа, которое не превышает сопротивление бетона на растяжение $R_{bt,n}= 1,55 \text{ МПа}$.

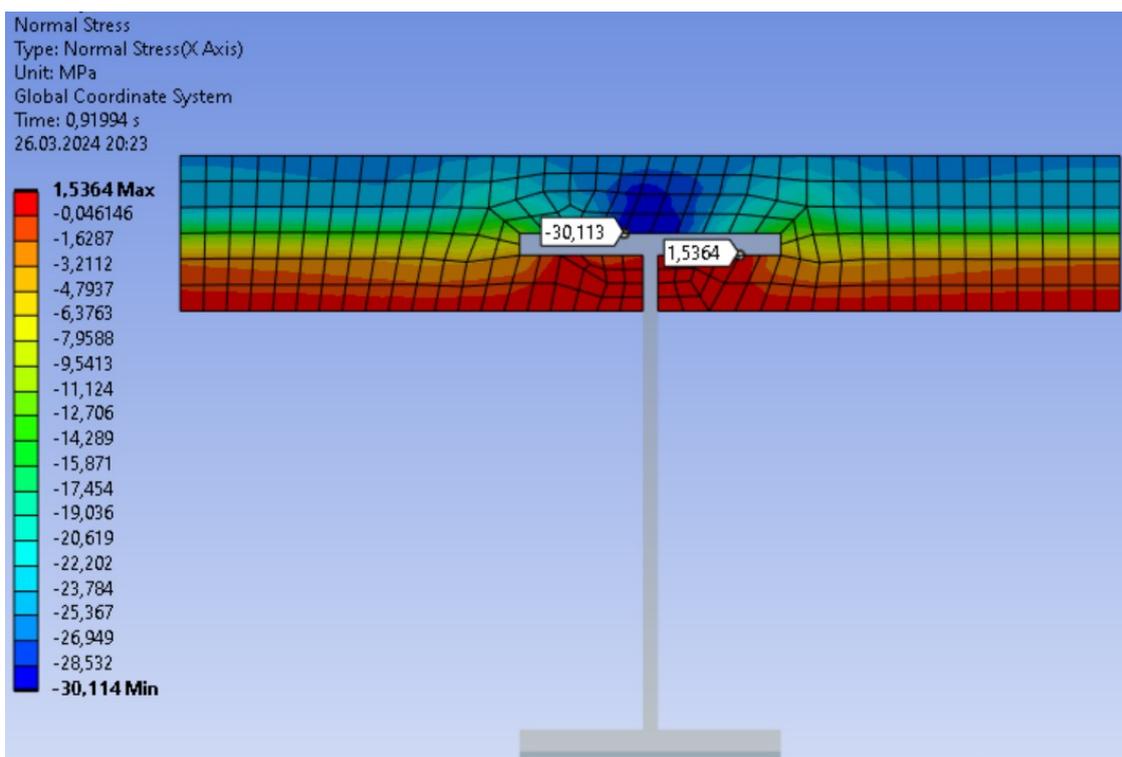


Рис. 5. Нормальные напряжения в бетонной плите (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Normal stresses in a concrete slab (illustration by the authors)

Относительные деформации в бетонной плите на рис. 6. В момент отказа в сжатой зоне сечения составляет 0,0032 мм/мм, что не превышает максимально допустимые деформации пункт 6.1.20 СП 63.13330.2018, в растянутой зоне 0,0009 мм/мм, что превышает максимально допустимые деформации пункт 6.1.22 СП 63.13330.2018. Это означает, что трещины образуются.

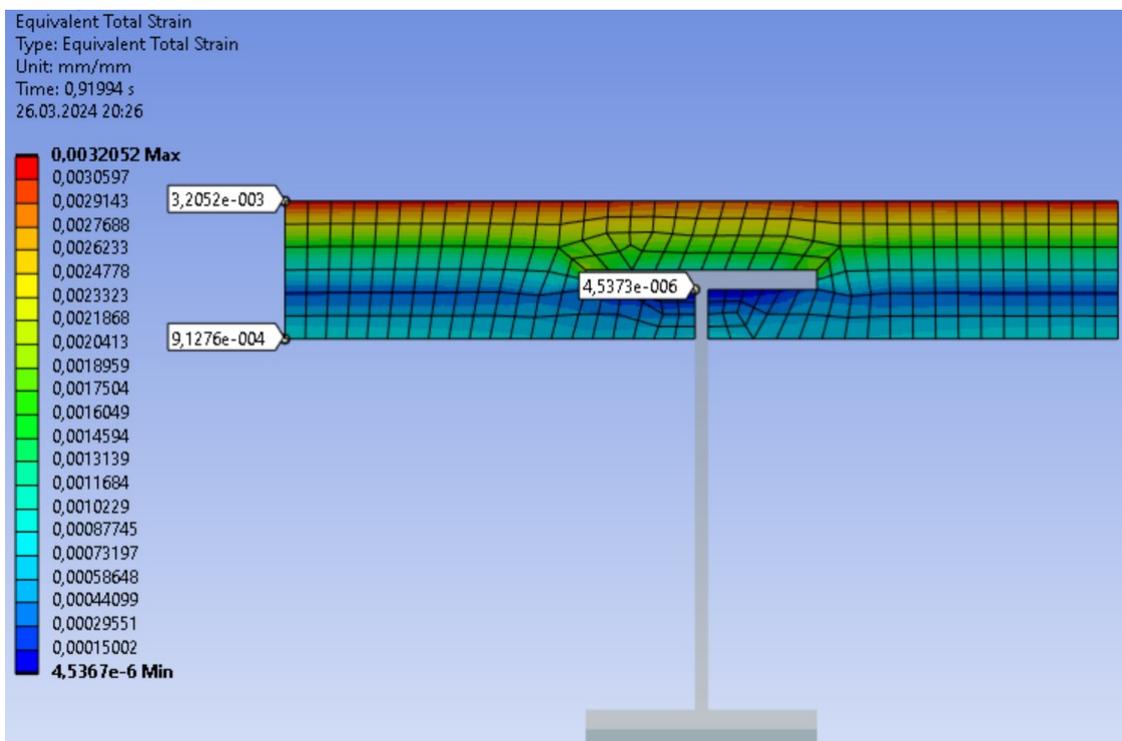


Рис. 6. Относительные деформации в бетонной плите (иллюстрация авторов)
 Fig. 6. Relative deformations in a concrete slab (illustration by the authors)

Нормальные напряжения в стальной балке на рис. 7. В момент отказа сечения составляют в растянутой зоне 248,47 МПа, что превышает сопротивление стали в упругой работе и означает, что сталь находится на площадке текучести в сжатой зоне 216,84 МПа, при этом сталь работает упруго.

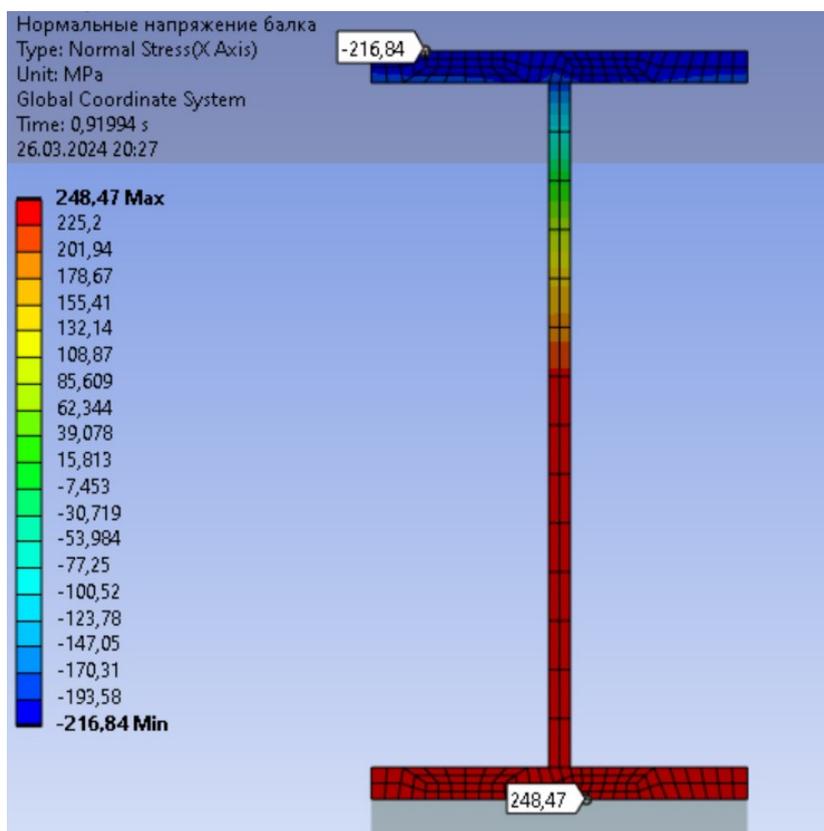


Рис. 7. Нормальные напряжения в стальной балке (иллюстрация авторов)
Fig. 7. Normal stresses in a steel beam (illustration by the authors)

Относительные деформации в стальной балке на рис. 8. В момент отказа сечения составляет в растянутой зоне 0,0098 мм/мм, сталь «течет» и находится между 0,0021 мм/мм (граница между упруго-пластичной работы и площадкой текучести) и 0,0017 мм/мм (граница между площадкой текучести и площадкой самоупрочнение стали). В сжатой зоне 0,00051 мм/мм, сталь работает упруго и находится на участке до 0,00098 мм/мм (граница начало упруго-пластичной работы стали).

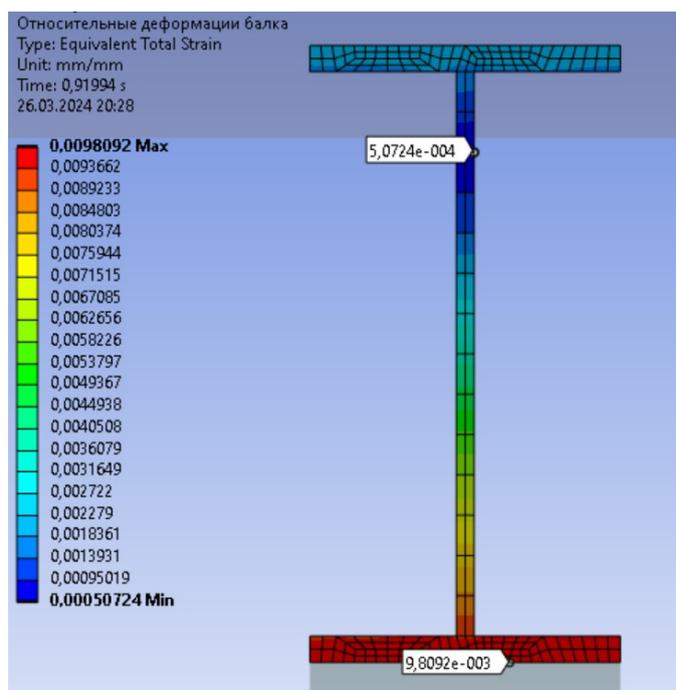


Рис. 8. Относительные деформации в стальной балке (иллюстрация авторов)
 Fig. 8. Relative deformations in a steel beam (illustration by the authors)

Из полученных результатов усилий и напряжений в поперечном сечении комбинированной балки, воспринимающий изгибающий момент можно представить на рис. 9. 1 стадия НДС зафиксирована на 0,70377 секунды при нагрузке, которая соответствует $P_{crс} = 300000 \cdot 0,70377 = 211131 \text{ N} = 21,53 \text{ т}$. 3 стадия НДС зафиксирована при нагрузке P_{ult}

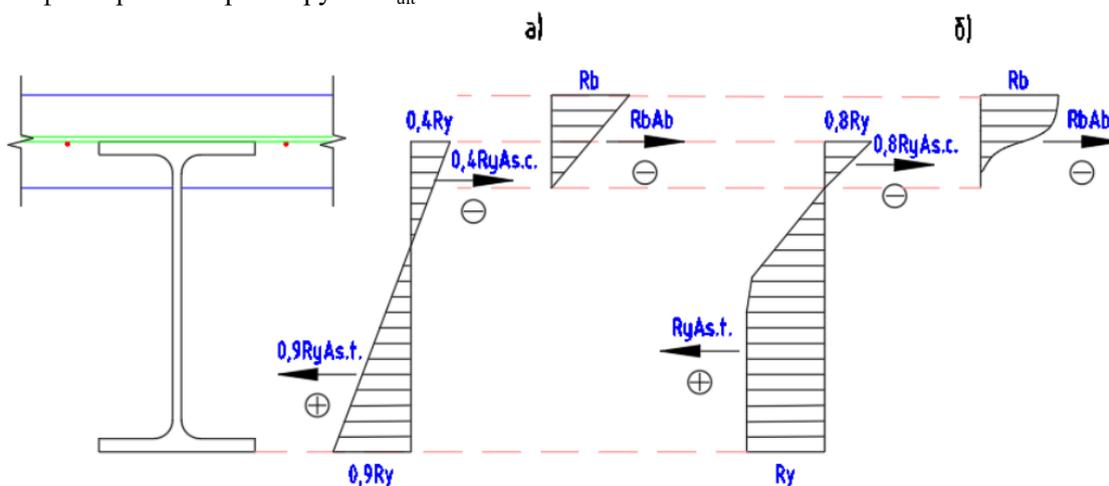


Рис. 9. Эпюры напряжений в сечении: а – 1 стадия НДС; б – 3 стадия НДС
 (иллюстрация авторов)

Fig. 9. Stress diagrams in the cross section: a – 1st stage of VAT; b – 3rd stage of VAT
 (illustrations by the authors)

Отказ сечения при достижении максимальных деформаций в сжатой зоне бетона. Растянутый участок стальной балки находится на площадке текучести, а именно сечение отказывает пластично и не способствует хрупкому разрушению. Стальная балка эффективно работает. Большая часть сечения находится в растянутой зоне, сжатая зона раскреплена в плите и не способствует потери устойчивости. Бетонная плита находится в сжатой зоне на 85 %, остальные 15 % в растянутой зоне, без образований силовых трещин.

Для оптимального подбора толщины бетонной плиты выполнен вариативный расчет. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение результатов расчета

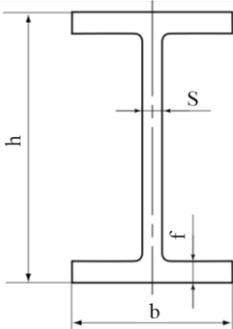
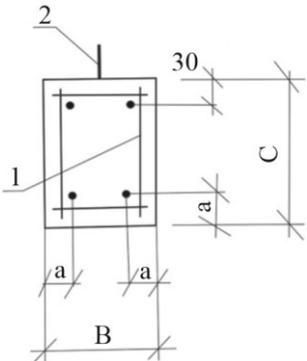
Толщина плиты, мм	Прогиб балки, мм	$P_{ср}, T$	P_{ult}, T	Участок разрушения балок
50	35,062	23,74	28,27	Сжатая зона бетонной плиты
60	33,075	21,53	28,14	Сжатая зона бетонной плиты
70	31,474	16,82	27,98	Сжатая зона бетонной плиты
80	29,888	12,21	27,86	Сжатая зона бетонной плиты

Критерием подбора толщины бетонной плиты является шаг балок в составе перекрытия. Чем больше шаг стальных балок, тем требуется большая толщина плиты для восприятия изгибающего момента в пролете между балок.

Для сравнения несущей способности и прогибов выбраны: 1) исследуемая балка; 2) стальная двутавровая балка [12]; 3) железобетонная балка [13]. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнение балок

№	Сечение балки	Характеристика материалов	Несущая способность
1	Исследуемая балка см. Рис. 1		$P_{ult} = 28,14 \text{ т}$ Прогиб = 33,075 мм
2		Двутавров нормальный (Б) по ГОСТ 260-20-83 23Б1; $h=230\text{мм}$; $b=110\text{мм}$; $s=5,6\text{мм}$; Сталь С245 по ГОСТ 27772; $R_y=240 \text{ МПа}$, $R_u=360 \text{ МПа}$ $L=3\text{м}$ Упругий расчет	$P_{ult} = 16,92 \text{ т}$ Прогиб = 9 мм
3		Железобетонная балка серия 1.126.1 КЛ-1 Б 32.38-22-6Т; $B=380 \text{ мм}$; $C=220 \text{ мм}$; Бетон В20 $R_b=11,5 \text{ МПа}$; Арматура А400 $R_s=400 \text{ МПа}$ $A_s=36,54 \text{ см}^2$; $A_s'=11,52 \text{ см}^2$. Упругий расчет	$P_{ult} = 18 \text{ т}$ Прогиб = 14 мм

Из анализа несущей способности и прогибов балок видно, что исследуемая балка имеет больший прогиб, так как расчет был произведен в нелинейной поставке, была допущена пластичная работа стального двутавра. При этом несущая способность в 2,23 раза выше, чем у второго образца и на 1,56 раз выше, чем у третьего образца. Можно сказать, что при использовании комбинированной балки: 1) увеличивается несущая способность комбинированных (сталебетонных) балок; 2) экономия материала, не требуется установка гибких упоров и других элементов для обеспечения совместной работы балки и плиты; 3) уменьшается строительная высота сечения.

4. Заключение

1. Описаны достоинства предложенного варианта комбинированной (сталебетонной) балки. На основе напряженно-деформированного состояния определен характер разрушения сечения, который достигается при относительных деформациях 0,0032 мм/мм в сжатой зоне бетонной плиты при нагрузке 28,14 т.
2. Определен прогиб сечения, который в момент разрушения составляет 33,075 мм. Проанализировано напряженно-деформированное состояние на участке действия

- изгибающего момента. Применены актуальные теории поведения бетона и стали.
3. Представлены эпюры напряжений на участке действия изгибающего момента. Определены критерии подбора толщины плиты.
 4. Намечены дальнейшие исследования напряженно-деформированного состояния по касательным напряжениям на участке совместного действия изгибающего момента и поперечных сил.
 5. Сечение можно эффективно использовать, где требуется пластичная работа перекрытий. Область применения сечения в зданиях и сооружениях, а также в мостовых конструкциях.

Список литературы/References

1. Веселова. Е.А., Комшин С.В. Конструктивные системы жилых высотных зданий 2022, монография, 141 стр. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. [Veselova E.A., Kamyshin S.V. Structural systems of residential high-rise buildings 2022, monograph, 141 p. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Engineering].
2. Исаков, Л.А. Высотное строительство в России 2016, Синергия 2016 № 6, стр. 442-458. [Isakov, L.A. High-rise construction in Russia 2016, Synergy 2016 No. 6, P. 442-458].
3. А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Д.С. Дмитриев, А.И. Нагибович, Н.О. Петрашев, С.О. Петряшев. Расчетное исследование параметров механической безопасности высотного строительства (404 метра) жилого комплекса «One Tower» в деловом центре «Москва-Сити» 2019, АСАДЕМИКА, Архитектура и строительство стр. 122-129. [A.M. Belostotsky, P.A. Akimov, D.S. Dmitriev, A.I. Nagibovich, N.O. Petrashev, S.O. Petryashev. Computational study of the parameters of mechanical safety of high-rise construction (404 meters) of the residential complex "One Tower" in the business center "Moscow City" 2019, АСАДЕМИКА, Architecture and construction P. 122-129].
4. Лекина. Д.К., Океанов Г.В., Архитектура большепролетных светопрозрачных покрытий футбольных стадионов 2018, Промышленное и гражданское строительство № 6, стр. 9-16. [Leikina. D.K., Okeanov G.V., Architecture of large-span translucent coatings of football stadiums 2018, Industrial and civil engineering No. 6, P. 9-16].
5. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Аул, А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к чемпионату мира по футболу 2018 года, АСАДЕМИКА. Архитектура и строительство 2018 №3, стр. 118-129. [Belostotsky A.M., Akimov P.A., Aul, A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Yu.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S. Calculation justification of mechanical safety of stadiums for the 2018 FIFA World Cup, АСАДЕМИКА. Architecture and Construction 2018 No.3, P. 118-129].
6. Тарасикова В.Е., Крючков А.А., Теоритические и экспериментальные исследования сталежелезобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова 2020, сборник трудов конференции, стр. 86-91. [Tarasikova V.E., Kryuchkov A.A., Theoretical and experimental studies of steel-reinforced concrete floors on steel profiled flooring, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 2020, proceedings of the conference, P. 86-91].
7. Рихтер Д.А., Иовенко А.А., Ершов М.Н. Проектирование сталежелезобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу с применением анкерных упоров HILTIХ-HVB / Международный центр по развитию и внедрению механизмов саморегулирования. 2012. 17-22 стр. [Richter D.A., Iovenko A.A., Ershov M.N. Design of steel-reinforced concrete floors on steel profiled flooring using HILTIХ-HVB anchor stops / International Center for the Development and Implementation of self-regulation mechanisms. 2012. P. 17-22].
8. Ведяков И.И., Конин Д.В., Крылов С.Б., Семенов В.А., Крылов А.С., Рожкова Л.С. Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций 2018 [Vedyakov I.I., Konin D.V., Krylov S.B., Semenov V.A., Krylov A.S., Rozhkova L.S.

- Guide to the design of steel-reinforced concrete structures 2018].
9. Туснин А.Р. Численный расчет сталежелезобетонных конструкций, 2022. С. 61-73. DOI: 10.22227/2305-5502-2022.1.5. [Tusnin A.R. Numerical calculation of steel-reinforced concrete structures, 2022. P. 61-73. DOI: 10.22227/2305-5502-2022.1.5].
 10. Ахрамочкина Т.И. Теоритические и экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций с применением гнутых стальных профилей, 2021. С. 27-40. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.3. [Akhramochkina T.I. Theoretical and experimental studies of steel-reinforced concrete structures using bent steel profiles, 2021. P. 27-40. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.3.].
 11. Васылев В.Н., Миронов А.Н., Анищенко В.М., Игнатенко Д.Р. Экспериментальные исследования совместной работы стального элемента и бетона по поверхности их соприкосновения. 2022, том 28, номер 3. [Vasiliev V.N., Mironov A.N., Anishchenkov V.M., Ignatenko D.R. Experimental studies of the joint operation of a steel element and concrete on the surface of their contact. 2022, volume 28, number 3.]
 12. Замалиев Ф.С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок. Вестник МГСУ. 2018. Вып. 3(11). С.309-321. [Zamaliyev F.S. Numerical and full-scale experiments of pre-stressed steel-reinforced concrete beams. Bulletin of MGSU. 2018. Issue. 3(11). P.309-321.]
 13. Кибириева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона. Ekologiya and Stroitelstvo. 2018. Номер 2, С. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. [Kibirieva Yu.A., Astafieva N.S. The use of steel-reinforced concrete structures. Ecology and construction. 2018. Number 2, P. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.]
 14. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России. Успехи современной науки. 2017. Номер 4, С. 205-208. [Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. Successes of modern science. 2017. Number 4, P. 205-208.]
 15. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий. Строительство и реконструкция. 2021;(5):3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15. [Zamaliyev F.S., Tamrazyan A.G. On the calculation of steel-reinforced concrete ribbed slabs for restored floors. Construction and reconstruction. 2021;(5):3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15].

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Павлов Максим Николаевич, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavlov.m.n@bk.ru

Гайнетдинов Ришат Габдулхаевич, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru

Information about the authors

Ilshat T. Mirsayapov, doctor of technical sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Maksim N. Pavlov, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: pavlov.m.n@bk.ru

Rishat G. Gainetdinov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru

УДК: 69.001.6
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.9
EDN: JCJSIZ



Опыт проектирования и строительства репродукторов II-го порядка

Л.Ш. Сибгатуллина¹, А.Г. Хабибулина¹, А.М. Сибгатуллин²
¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
²ООО «ПЦ Град»
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью реализации эффективных проектов в агропромышленном комплексе, что является одним из ключевых факторов обеспечения продовольственной безопасности. Этот аспект представляет собой одно из приоритетных направлений государственной политики на протяжении долгосрочного периода. Цель данного исследования заключается в анализе существующего опыта проектирования и оценке перспектив развития строительства объектов промышленных птицеводческих хозяйств, направлено на изучение и адаптацию передовых технологий и методов, используемых в данной области. Задачами исследования являются: обзор опыта проектно-изыскательских работ в рамках реализации проекта «Репродуктор 2-го порядка бройлерного направления»; разработка эффективного, технологичного и экологически устойчивого комплекса для индустриального птицеводства, включающего в себя использование современных строительных конструкций, материалов, инженерных систем и сооружений; предложение основы для разработки методических рекомендаций по созданию проектной документации промышленных объектов в сфере птицеводства.

Результат. Основным результатом данного исследования является комплексный подход к разработке проекта, направленного на создание эффективного, технологичного и экологически устойчивого комплекса для индустриального птицеводства. Этот подход включает в себя применение современных строительных конструкций, материалов, инженерных систем и сооружений, а также учет всех нормативных требований и стандартов.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли проявляется в предложенном авторами исследования комплексном подходе к проектированию объектов промышленного птицеводства.

Ключевые слова: племенные репродукторы, проектирование и строительство объектов промышленного птицеводства

Для цитирования: Сибгатуллина Л.Ш., Хабибулина А.Г., Сибгатуллин А.М. Опыт проектирования и строительства репродукторов II-го порядка // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 83-95, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.9, EDN: JCJSIZ

Experience in design and construction of 2nd order reproducers

L.Sh. Sibgatullina¹, A.G. Khabibulina¹, A.M. Sibgatullin²
¹Kazan State University of Architecture and Engineering
²LLC «PTs Grad»
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The relevance of this study is due to the need to implement effective projects in the agro-industrial complex, which is one of the key factors in ensuring

food security. This aspect represents one of the priority directions of the state policy during the long-term period. The purpose of the study is to review the design experience and prospects for the development of construction of industrial poultry farms. The objectives of the study are to review the experience of design and survey works within the framework of the project «2nd order broiler reproducer»; to develop an effective, technological and environmentally sustainable complex for industrial poultry farming, including the use of modern building structures, materials, engineering systems and facilities; to propose the basis for the development of methodological recommendations for the creation of design documentation of industrial facilities in the field of poultry farming.

Results. The main result of this study is an integrated approach to project development aimed at creating the efficient, technological and environmentally sustainable complex for industrial poultry farming. This approach includes the use of modern building structures, materials, engineering systems and facilities, as well as consideration of all regulatory requirements and standards.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is manifested in the integrated approach to the design of industrial poultry facilities proposed by the authors of the study.

Keywords: breeding farms, design and construction of industrial poultry farming facilities.

Для цитирования: Sibgatullina L.Sh., Khabibulina A.G., Sibgatullin A.M. Experience in design and construction of 2nd order reproducers // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 83-95, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.9, EDN: JCJSIZ

1. Введение

В Российской Федерации утверждена Доктрина продовольственной безопасности¹. Доктрина отражает основные направления государственной социально-экономической политики в области обеспечения продовольственной безопасности страны, при этом одной из ключевых задач в этой сфере является обеспечение устойчивого развития животноводства. В VI разделе Доктрины указано о необходимости создания новых производственных мощностей, реконструкции и развития действующих производств, связанных с животноводством. Импортзамещение в сельском хозяйстве имеет решающее значение для обеспечения продовольственной безопасности страны, придания мощного импульса развитию крупных, средних и малых форм хозяйствования, выхода на самообеспечение по основным видам продовольствия. Меры государственной поддержки промышленного птицеводства в России направлены на повышение научно-технологического развития и выявление резервов эффективности производства продукции². Оба этих аспекта важны для развития отрасли и могут способствовать увеличению производства и конкурентоспособности птицеводства в России [1, 2]. Реализации эффективных проектов в агропромышленном комплексе, что является одним из ключевых факторов обеспечения продовольственной безопасности. Этот аспект представляет собой одно из приоритетных направлений государственной политики на протяжении долгосрочного периода. Современные требования к интенсивности развития, рентабельности животноводческих комплексов и фермерских хозяйств в России указывают на необходимость строительства и модернизации производственной инфраструктуры с использованием инновационных строительных технологий, конструкций и материалов для создания оптимальных условия содержания животных [3-5]. Одним из основным требований в промышленном животноводстве, является повышение экологической безопасности для окружающей среды. Птицеводство считается одной из значительных причин загрязнения окружающей среды, включая атмосферу, почву,

¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Указ Президента РФ № 20 от 21 января 2020 года.

² Подпрограмма «Создание отечественного конкурентоспособного кросса мясных кур в целях получения бройлеров» Правительства Российской Федерации № 782 от 28 мая 2020 г. в рамках Программы «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы».

подземные и грунтовые воды. Это связано со сбросом птичьего помета, производственных отходов, с выбросами аммиака и других вредных газов в окружающую среду. Например, птицеферма, содержащая 100000 особей, за год вырабатывает около 4000 т помета [6-8]. С увеличением объема промышленного производства птиц на ограниченной территории возникает актуальная проблема обработки отходов. При проектировании птицеводческих комплексов следует применять системный подход к решению данной проблемы, учитывая экологические и гигиенические аспекты [9-11].

Цель данного исследования заключается в анализе существующего опыта проектирования и оценке перспектив развития строительства объектов промышленных птицеводческих хозяйств, направлено на изучение и адаптацию передовых технологий и методов, используемых в данной области.

Задачи исследования включают в себя:

1. На основе опыта выполнения проектно-изыскательских работ в рамках реализации проекта «Репродуктор 2-го порядка бройлерного направления» провести исследование, учитывающее современные тенденции, как зарубежные, так и отечественные, в области проектирования и строительства животноводческих комплексов.
2. Разработку эффективного и экологически устойчивого комплекса для индустриального птицеводства, включающего в себя использование современных строительных конструкций, материалов, инженерных систем и сооружений, с учетом всех нормативных требований и стандартов.
3. Предложение основы для разработки методических рекомендаций по созданию проектной документации промышленных объектов в сфере птицеводства.

2. Материалы и методы

Исследуемый объект: Репродуктор 2-го порядка бройлерного направления (далее Репродуктор). Место расположения Репродуктора: Российская Федерация, Республика Татарстан, муниципальный район Бугульминский, сельское поселение Спасское. Репродуктор состоит из следующих основных зон: Ефановка РС-1, РС-2; Садовая РС-3, РС-4; Рычковская РС-5, РС-6, РП (петушатник); Спасская РС-7, РС-8; Свахина РМ-1; Алга РМ-2; Дымская РМ-3; Гремячевская РМ-4; Пометохранилище (рис. 1). На территории данных зон спроектировано 20 птичников.

Проектная документация разработана для строительства в климатическом районе I В, со следующими характеристиками:

- расчетная снеговая нагрузка V район – 320 кг/м² (расчетное значение);
- ветровая нагрузка (II район) – 30 кг/м (нормативное значение);
- расчетная температура наружного воздуха – минус 47 °С;
- нормативная глубина промерзания грунта – 1,70 м (согласно данным геологических исследований).

Рассматриваемая территория строительства Репродуктора, согласно карте районирования Республики Татарстан, по климатическим условиям расположена в климатическом подрайоне I В³. Климат данной территории умеренно-континентальный с прохладным и сравнительно влажным летом, умеренно холодной и снежной зимой. Среднегодовая годовая температура воздуха составляет 3,5 °С. Средняя температура воздуха в июле составляет 18-19 °С, в январе –12,0 - –14,0 °С. Высотное положение территории создает своеобразный местный температурный режим. Зима является самым продолжительным сезоном года и длится в среднем 120-130 дней. Вследствие возвышенного положения, район строительства лучше обеспечен осадками и имеет температуру воздуха ниже, чем окружающие низменные территории. Ветры, в большинстве случаев, наблюдаются западного и южного направления, значительно реже – восточного направления. Средние скорости ветра: наибольшая в январе – 5,1 м/с, наименьшая в июле – 3,0 м/с.

³ Климатическая характеристика территории строительства Репродуктора составлена по материалам ФГБУ «Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Татарстан», на основе многолетних наблюдений на метеостанции МС г. Бугульма – ближайшей к территории предприятия.

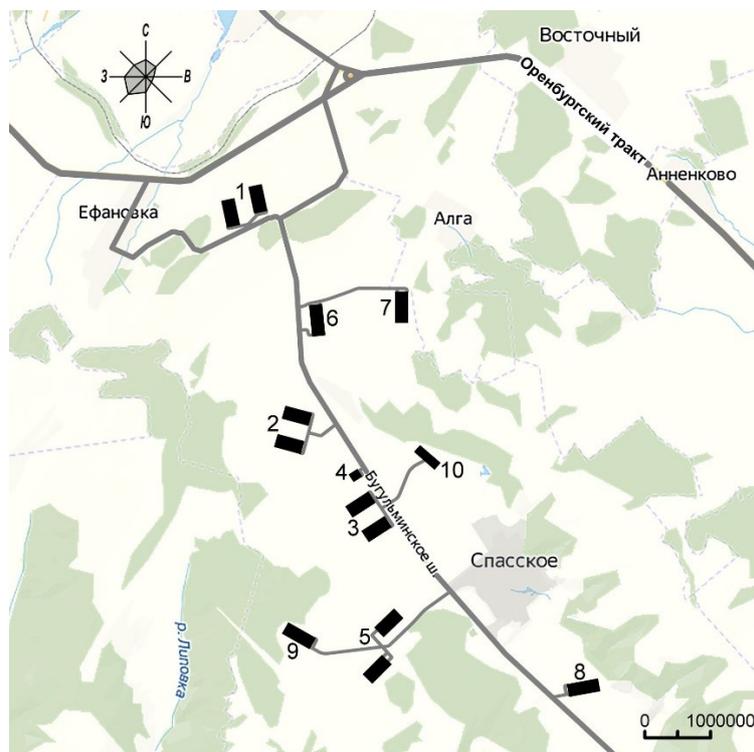


Рис. 1. Ситуационный план. Зоны Репродуктора: 1 – Ефановка РС-1, РС-2; 2 – Садовая РС-3, РС-4; 3 – Рычковская РС-5, РС-6; 4 – Рычковская РП; 5 – Спасская РС-7, РС-8; 6 – Свахина РМ-1; 7 – Алга РМ-2; 8 – Дымская РМ-3; 9 – Гремячевская РМ-4; 10 – Пометохранилище (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Layout Plan. Reproducer zones: 1 – Efanovka RS-1, RS-2; 2 – Sadovaya RS-3, RS-4; 3 – Rychkovskaya RS-5, RS-6; 4 – Rychkovskaya RP; 5 – Spasskaya RS-7, RS-8; 6 – Svahina RM-1; 7 – Alga RM-2; 8 – Dymskaya RM-3; 9 – Gremjachevskaya RM-4; 10 – Manure storage (Illustration by the authors)

В качестве материала для данного исследования был выбран Репродуктор бройлерного направления. Исследование проводится в контексте его использования в качестве модели для формирования типовых проектных решений в области создания проектной документации для промышленных объектов птицеводства. Исследование базируется на комплексном подходе к разработке проекта эффективного, технологически совершенного и экологически безопасного комплекса для индустриального птицеводства.

3. Результаты и обсуждение

Основной вид деятельности Репродуктора – разведение птицы и производство инкубационного яйца. Производственная мощность птицекомплекса составляет до 120 млн. инкубационных яиц в год. Это комплекс полного цикла, начиная от инкубатора и заканчивая забоем птицы (табл. 1).

Репродуктор включает в себя следующие основные процессы:

- выращивание и откорм родительского стада для последующего производства и откладки яиц (8 зон);
- выращивание ремонтного молодняка (4 зоны);
- дорастивание петушков (1 зона);
- на 64-ой неделе содержания – транспортировка птицы на убой.

Таблица 1

Характеристика основных объектов Репродуктора

Технико-экономические показатели объектов	Производственные зоны		
	Родительское стадо (РС)	Ремонтный молодняк (РМ)	Резервные петушки (РП)
Количество зон, шт.	8	4	1
Количество птичников, шт.	9	9	2
Площадь застройки одного птичника, м ²	2064	1260 для петухов (3 шт.) 2376 для кур (6 шт.)	990
Размеры птичника, м:	16,0x129,0x3,95	15,0x84,0x3,4 (3 шт.) 18,0x132,0x3,4 (6 шт.)	15,0x66,0x3,4
Размеры пристроек, м:			
- весовая	4,09x2,3x3,0	4,4x2,93x3,0	-
- операторская	11,6x1,5x3,0	7,8x6,19x3,0	6,52x6,26
Санпропускник с дезбарьером, размер в осях, м	18,8x24,0x6,56	18,8x24,0x6,56	18,8x24,0x6,56
Размеры дезбарьера, м	9,19x24,24x6,5	9,19x24,24x6,5	-
Размеры яйцесклада, м	27,0x21,0x7,9	-	-
Общее посадочное поголовье в одной партии, голов	103131	21400	1953
Расход электроэнергии, кВт/год	3567948	2463350,4	426384
Расход воды, м ³ /год	25682,13	3612,12	939,46

Примечание: Размеры строений в плане указаны в осях. Высоты строений: птичников – в середине пролета, в пристраиваемых помещениях – до низа подвешеного потолка.

Инженерные изыскания на участке строительства выполнены ООО «НПЦ Град». Раздел рабочего проекта «Конструктивные и объемно-планировочные решения. Конструкции металлические» разработан ООО «Научно-исследовательская и проектно-строительная фирма «Уникон».

При проектировании объектов Репродуктора использовались следующие расчетные программные комплексы:

- для фундаментов – Статика «ING+»;
- для строительных конструкций – «Autodesk Robot Structural Analysis», «SCAD», Autodesk Robot Structural Analysis Professional;
- для графические части – «AutoCAD».

Проектная документация разработана для следующих условий строительства:

- Класс ответственности зданий – II;
- Степень огнестойкости – III;
- Класс функциональной пожарной опасности здания – Ф 5.3.

Территории, отводимые под строительство объектов Репродуктора, были представлены землями сельскохозяйственного назначения. Земельные участки расположены за пределами особо охраняемых природных территорий федерального, регионального, местного значения и не затрагивают территории объектов культурного наследия, состоящих на государственной охране. В результате ранее антропогенного освоения преобладали распаханые земельные угодья (пашня) и выгон. При строительстве объекта не потребовалась вырубка древесно-кустарниковой растительности.

Лабораторные исследования показали, что согласно СанПиН 2.1.7.1287-03 по эпидемической опасности отобранные пробы почвы на участках строительства Репродуктора соответствуют категории «чистая». Отсутствие превышений по всем компонентам в пробах почвы, указывает на отсутствие отрицательного влияния существующих объектов на почвенный покров территории. При проведении пешеходной гамма-съемки источники ионизирующего излучения и участки с повышенными уровнями

гамма-фона на обследованной территории не обнаружены.

Основными источниками выделения загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации Репродуктора являются: птичники, бункеры с комбикормом, отопительное оборудование, дезбарьер, выгреб, место сбора ливнестоков, автотранспорт. В атмосферный воздух выделяются загрязняющие вещества 24 наименований, валовый выброс которых в среднем составляет 64,705 т/год. Наибольшие из них: метан – 22,909 т/год; оксид углерода – 16,726 т/год; пыль пуховая – 8,256 т/год; диоксид азота – 6,396 т/год; аммиак – 5,784 т/год и др. Расчет рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере производился в программе «Эколог 3.0 «Стандарт», разработанной фирмой «Интеграл» (г. Санкт-Петербург) и согласованной ГГО им. А.И. Воейкова. Метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ и фоновое загрязнение в атмосфере были представлены ФГБУ «УГМС Республики Татарстан». Расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации объектов Репродуктора, показали, что максимальные приземные концентрации вредных веществ на границах ориентировочной санитарно-защитной зоны и ближайшей жилой зоны не превысят 1,0 ПДК. Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (п. 7.1.11) размер ориентировочной санитарно-защитной зоны для объектов Репродуктора составляет 1000 м. Основными источниками шума при эксплуатации объектов Репродуктора будут являться оборудование вентиляционной системы, отопительное оборудование, автотранспорт. Расчет суммарных уровней звукового давления выполнен на программном комплексе «Эколог-Шум» фирмы «Интеграл», разработанном в соответствии с требованиями СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». Шумовые характеристики источников шума, необходимые для проведения акустических расчетов были приняты на основании справочных данных. Согласно расчётам, установлено, что превышений уровней звукового давления в расчетных точках, принятых на границе ориентировочной санитарно-защитной зоны и на территории жилой застройки соответствует нормативным требованиям. Таким образом, эксплуатация объектов Репродуктора не оказывает существенного воздействия на атмосферный воздух в районе его размещения и на сопредельных территориях.

В техническом отчете по результатам инженерно-экологических изысканий был представлен прогноз возможных неблагоприятных изменений при эксплуатации объектов Репродуктора, проработаны мероприятия и даны рекомендации по организации контроля за состоянием атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод на территории предприятия.

Проектные работы включали в себя производственные объекты Репродуктора в 13 зонах и площадку компостирования помета.

Редуктор разделен на три основные зоны: производственная, хозяйственная, транспортная. Производственная зона делится, в зависимости от назначения площадки, на зону выращивания; бункеры хранения комбикормов; бытовые здания и сооружения с помещениями технического обеспечения. Хозяйственная зона включает в себя: водозаборный узел; выгреб для хозяйственно-бытовых сточных вод; помещения для временного складирования павшей птицы; санпропускники. Транспортная зона подразделяется соответственно на: дезбарьер со вскрывочной; дезинфекционный блок транспортных средств с дезбарьером (рис. 2).

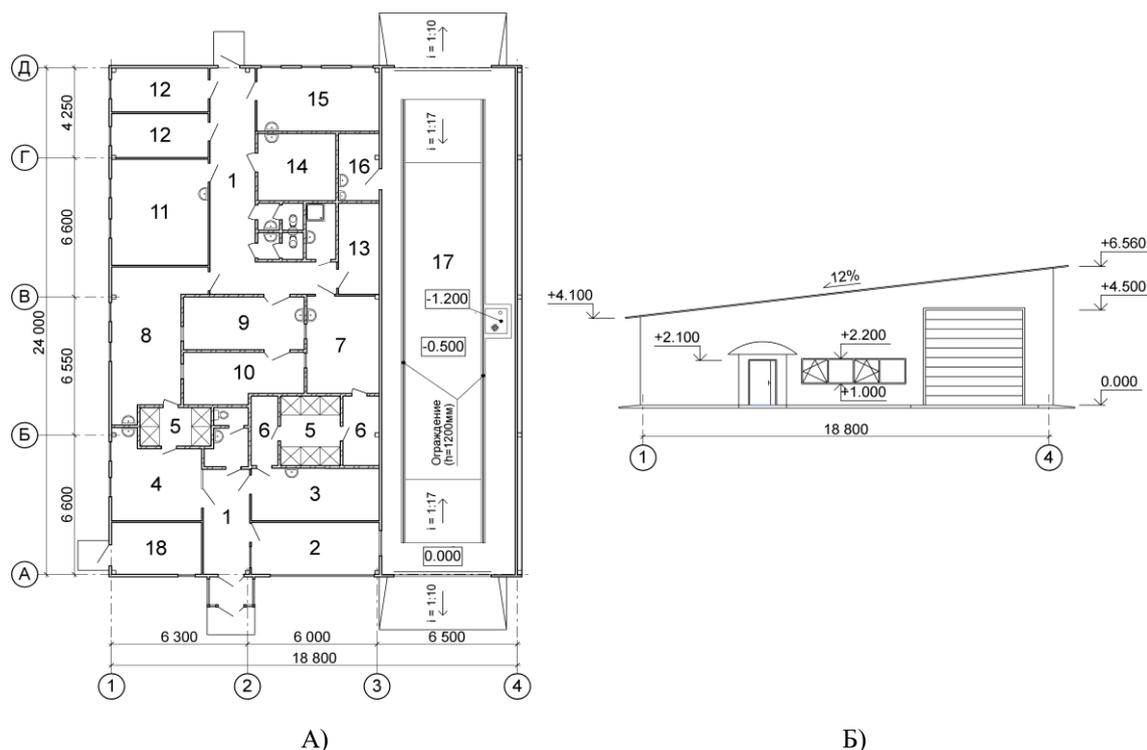


Рис. 2. Санпропускник. А) План: 1 – коридор; 2 – помещение охраны; 3 – женская гардеробная домашней одежды; 4 – мужская гардеробная домашней одежды; 5 – душевая; 6 – преддушевая; 7 – женская гардеробная спецодежды; 8 – мужская гардеробная спецодежды; 9 – постирочная; 10 – кладовая спецодежды; 11 – комната приема пищи; 12 – кабинет; 13 – кладовая; 14 – помещение для хранения медикаментов; 15 – мастерская; 16 – помещение для дезрастворов; 17 – бокс для дезинфекции транспорта; 18 – топочная. Б) Фасад в осях 1-4 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Sanitary facilities. A) Plan: 1 – corridor; 2 – security room; 3 – women's dressing room for home clothes; 4 – men's dressing room for home clothes; 5 – shower room; 6 – pre-shower room; 7 – women's overalls dressing room; 8 – men's overalls dressing room; 9 – laundry room; 10 – overalls storage room; 11 – meal room; 12 – office; 13 – storage room; 14 – medicine storage room; 15 – workshop; 16 – room for disinfectants; 17 – box for transportation disinfection; 18 – furnace room. B) Facade in axes 1-4 (Illustration by the authors)

Территория размещения производственных площадок Репродуктора не располагала существующей транспортной инфраструктурой. К основной автодороге «Бугульма-Татарская Дымская» примыкающей к Оренбургскому тракту, проектом предусматривалось устройство подъездных автодорог общей протяженностью 9,815 км. Основной вид внешнего и внутриплощадочного транспорта – автомобильный. Зоны Репродуктора имеет два въезда, и подразделяется на две зоны грязную и чистую. Проезды запроектированы с двухскатным и односкатным поперечным профилем, с покрытием из асфальтобетона по щебеночному основанию.

Объемно-планировочные решения объектов Репродуктора выполнены в соответствии с действующими требованиями технологического процесса, действующих санитарных и противопожарных норм и правил, специализированными методическими рекомендациями⁴.

Архитектурная концепция всего комплекса определена производственными процессами, т.е. основным функциональным назначением Репродуктора (рис. 3).

⁴ СП 289.1325800.2017 «Сооружения животноводческих, птицеводческих и звероводческих предприятий. Правила проектирования»; РД-АПК 3.10.07.05-17 «Ветеринарно-санитарные требования при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации животноводческих помещений».

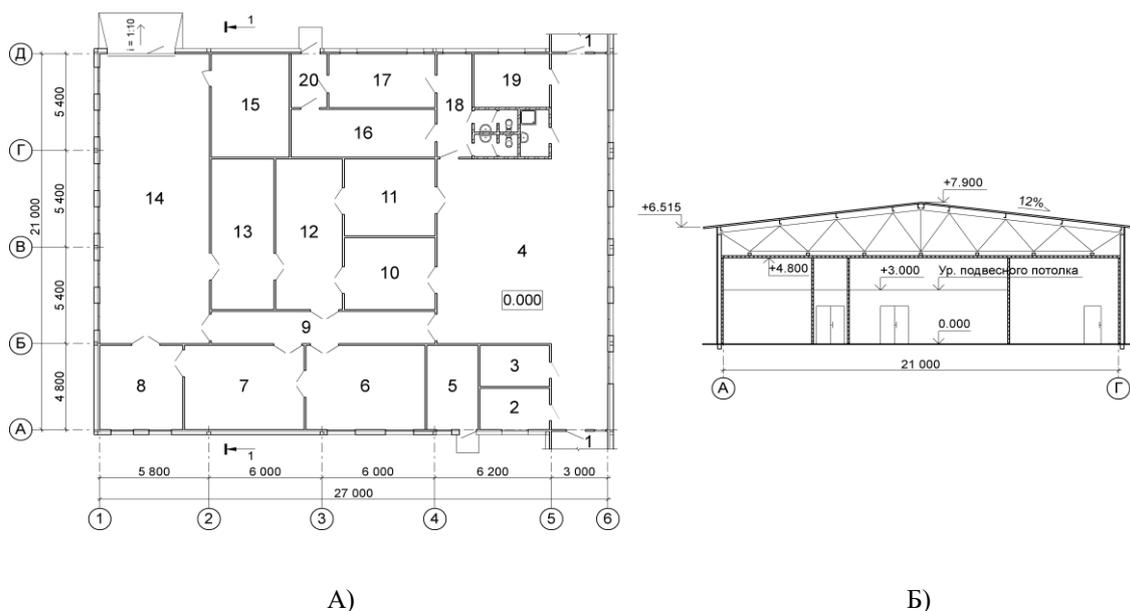


Рис. 3. Яйцесклад. А) План: 1 – галерея яйцесбора; 2 – административное помещение; 3 – подсобное помещение; 4 – помещение приёмки, сортировки, упаковки яиц; 5 – топочная; 6 – помещение упаковки яиц в коробки; 7 – помещение хранения яиц; 8 – помещение экспедиции яиц; 9 – коридор технологический; 10 – помещение накопления яиц; 11 – помещение обработанной тары; 12 – помещение газации яиц, тары; 13 – помещение приема тары; 14 – помещение отгрузки яиц; 15 – венткамера; 16 – гардеробная женская; 17 – гардеробная мужская; 18 – коридор; 19 – электрощитовая, операторская; 20 – тамбур. Б) Разрез 1-1 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Egg Storage. A) Plan: 1 – gallery for egg collection; 2 – administrative room; 3 – utility room; 4 – room of acceptance, sorting, packing of eggs; 5 – furnace room; 6 – room of packing eggs in boxes; 7 – room of storage of eggs; 8 – room of expedition of eggs; 9 – technological corridor; 10 – room of eggs accumulation; 11 – room of processed containers; 12 – room of eggs and containers gassing; 13 – room of containers reception; 14 – room of eggs shipment; 15 – ventilation chamber; 16 – dressing room for women; 17 – dressing room for men; 18 – corridor; 19 – electric control room, operator's room; 20 – vestibule. B) Section 1-1 (Illustration by the authors)

В проекте, объединяющем все объекты в единый комплекс, реализована идея эстетики лаконичной функциональности: одинаковый выбор ограждающих конструкций (облицовочных материалов); вертикальная ориентация раскладки профилированного листа и сэндвич панелей; схожие пропорции фасадного членения, расстановки визуальных акцентов и перекликающееся колористическое исполнение. В качестве отделочных материалов использовались: профилированные листы, сэндвич панели с заводским покрытием; керамическая, глазурованная плитка; краски на вододисперсионной основе. Заполнение оконных проемов произведено металлопластиковыми оконными блоками из 3-х камерного профиля, с заполнением однокамерными стеклопакетами с энергосберегающими стеклами. Заполнение наружных дверных проемов произведено металлическими дверными блоками.

Рассмотрим птичник ремонтного молодняка (РМ) для Свахина РМ-1; Алга РМ-2; Дымская РМ-3; Гремячевская РМ-4 (рис. 4).

Птичник представляет собой однопролетное одноэтажное здание с пролетом 15 м, с основным шагом колонн 6 м, с размерами в плане 15,0х84,0 м. Пристроенные помещения весовой имеют размеры 4,395х2,925 м, техническим помещением и операторской размерами 7,8х6,19м. Высота птичника до низа подвешенного потолка составляет 3,0 м у стен и 3,4 м в середине пролета. В пристраиваемых помещениях высота до низа подвешенного потолка составляет 3,0 м.

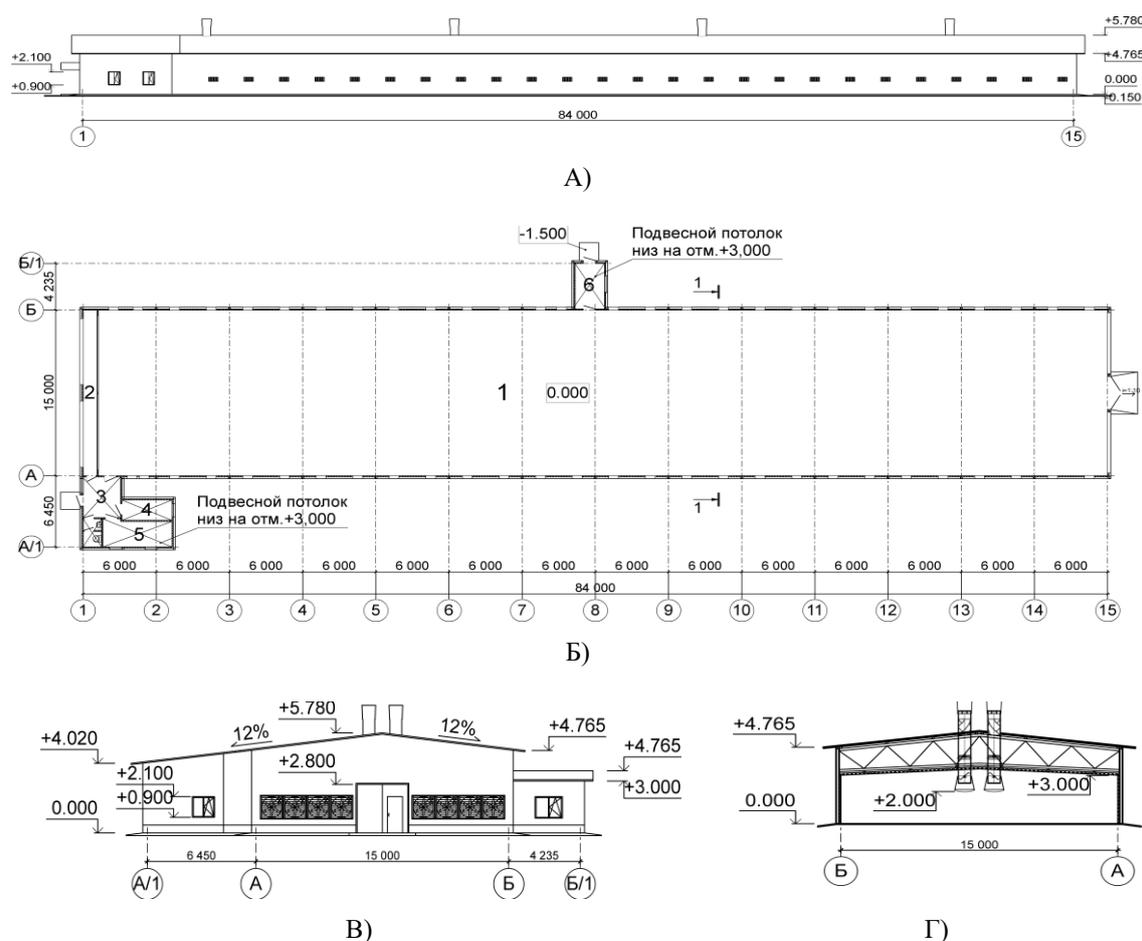


Рис. 4. Птичник ремонтного молодняка: А) Фасад 1-15. Б) План на отм. 0,000: 1 – помещение содержание птицы; 2 – техническое помещение; 3 – тамбур; 4 – операторская; 5 – помещение водоподготовки; 6 – весовая. В) Фасад А/1-Б/1. Г) Разрез 1-1 (иллюстрация авторов).
 Fig. 4. Replacement poultry house: A) Facade 1-15. B) Plan at 0,000: 1 – poultry keeping room; 2 – technical room; 3 – vestibule; 4 – operator's room; 5 – water treatment room; 6 – weighing room. C) Facade A/1-B/1. D) Section 1-1 (Illustration by the authors)

Конструкции фундаментов свайные – из буронабивных свай диаметром 350 мм (бетон В20), армированные пространственными каркасами с рабочей арматурой диаметром 12 мм класса А500С и соединительной поперечной диаметром 6 мм А240. Сваи объединены монолитным ростверком шириной 600 мм, высотой 450 мм (бетона В22,5). Основанием фундаментов, согласно результатам инженерно-геологического отчета, служит песчаник малопрочный ИГЭ-4 с расчетными характеристиками $\rho=1,90$ г/см³, $R_0=14,21$ МПа; глина казанская ИГЭ-3 с расчетными характеристиками $\rho=1,93$ г/см³, $c=36$ КПа, $\varphi=17^\circ$, $R_0=21$ МПа; известняк средней прочности с расчетными характеристиками $\rho=2,23$ г/см³, $R_0=35,0$ МПа.

Каркас здания является комплектной поставкой завода-изготовителя. Основными несущими конструкциями каркаса являются поперечные рамы, шаг рам – 6 м. Конструкции покрытия выполнены из ферм с поясами из гнутосварных труб квадратного сечения. Сопряжение ферм с колоннами-жесткое. Сопряжение полуферм между собой-шарнирное. Колонны каркаса изготовлены из гнутосварных труб, прогоны выполнены по разрезной схеме. Металлический каркас состоит из труб квадратного сечения. Пространственная жесткость строений обеспечивается собственной жесткостью конструкций, системой вертикальных и горизонтальных связей, прогонами покрытия.

Ограждающие конструкции стен, покрытия и внутренние перегородки выполнены из трехслойных сэндвич-панелей утепленные пенополиизоциануратом (ПИР плита 100 мм). Двери внутренние поливинилхлоридные, наружные металлические утепленные.

Ворота металлические, утепленные распашные. Кровля – скатная, состоящая из профлиста Н-75-750-0,7 по металлическим прогонам и фермам. Водоотвод наружный, неорганизованный. Для отвода дождевой воды вокруг здания предусмотрена бетонная отмостка шириной 1,0 м.

Применение «Сэндвич-панелей» в качестве ограждающих конструкций объектов Репродуктора является, на сегодняшний день, оптимальным решением, так как они несложны в монтаже и позволяют снизить стоимость строительства на 30 % по сравнению с каменными стенами [3]. С применением оптимизации ограждающих конструкций и использованием сэндвич-панелей, содержащих утеплитель на основе пенополиизоцианурата, достигается снижение капитальных вложений, а также уменьшение тепловых потерь объекта [12, 13]. Этот подход приводит к снижению нагрузки на систему отопления, что в свою очередь позволяет снизить потребляемую мощность источника теплоснабжения [14, 15]. Использование «Сэндвич-панелей» соответствует всем необходимым стандартам безопасности, энергоэффективности и прочим нормам для объектов промышленных птицеводческих хозяйств.

Инженерные системы для зданий птичников Репродуктора представляют собой комплексное обеспечение, предоставленное немецкой компанией «Hartmann»⁵. При принятии решения о выборе систем данной компании на начальном этапе разработки проектной документации в 2014 году, руководствовались её статусом лидера на мировом рынке среди производителей оборудования для выращивания и содержания племенной птицы, а также птиц мясного направления. Компания Hartmann ориентирована на предоставление полного комплекта услуг «под ключ», охватывающего все аспекты содержания птицы, начиная от планирования оборудования и заканчивая его техническим обслуживанием. Её предложение включает в себя все этапы – от использования инкубационной техники до оборудования для уоя и утилизации отходов.

Системы отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха птичников Репродуктора спроектированы с учетом следующих требований:

- Источником теплоснабжения, обеспечивающим здания птичников теплом, являются газовые теплогенераторы, устанавливаемые в здании. Теплогазогенераторы с воздушным отоплением рекуперативного типа.
- Система вентиляции. Для поддержания санитарно-гигиенических условий воздушной среды в помещениях запроектирована приточно-вытяжная система вентиляции, состоящая из трех плавно переходящих друг в друга фаз: минимальная, комбинированная и туннельная вентиляция.
- Удаление воздуха из помещения птичника осуществляется механическим побуждением при помощи торцевых вентиляторов, установленных в торце здания и коньковых вентиляторов.
- Приток воздуха в помещение птичника обеспечивается естественным способом через жалюзи и воздушно-приточных клапанов установленных периодически по длинным сторонам фасадов птичников.

Репродуктор был задуман как инновационный комплекс в области индустриального птицеводства, обеспеченный современными технологическими решениями, направленными на повышение качества производимой продукции и улучшение рабочих условий. В птичниках установлено современное компьютеризованное оборудование, позволяющее осуществить полный контроль параметров микроклимата и автоматизированную загрузку, взвешивание и раздачу корма животным без участия персонала. Мощность введенной в эксплуатацию электростанции гарантирует бесперебойное снабжение электроэнергией объектов птицекомплекса и близлежащих населенных пунктов. Собственные обустроенные артезианские скважины позволяют обеспечить птицекомплекс качественной питьевой водой.

На сегодняшний день, в современных условиях санкционного давления, оттока ряда иностранных компаний с российского рынка, при прекращении поставок

⁵ Hartmann Lebensmitteltechnik Anlagenbau GmbH. URL: <https://www.hartmann-la-gmbh.de/sfery-dejatelnosti/pticevodstvo/uslugi/?L=2> (дата обращения: 01.01.2023).

импортного оборудования и комплектующих, вопросы импортозамещения приобрели наивысший уровень актуальности [16-18]. На правительственном уровне рассматриваются вопросы обратного инжиниринга оборудования и комплектующих для агропромышленного комплекса. Для достижения технологического суверенитета Российской Федерации в сфере АПК определены основные направления дальнейших работ⁶:

- Создание рабочих команд с участием производителей оборудования, инжиниринговых компаний, предприятий АПК.
- Решение вопросов о корректировке действующих мер государственной поддержки производителям отечественного оборудования.

Проектировщики, перед принятием окончательных решений относительно новых, реконструируемых и модернизируемых зданий и сооружений в области животноводства, должны акцентировать свое внимание на инновационных технологиях, конструкциях и материалах для строительства, а также на экологически устойчивых решениях. Это включает в себя анализ возможности использования базовых компонентов и материалов отечественного производства с целью обеспечения стабильного функционирования данных объектов.

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе опыта выполнения проектно-исследовательских работ в рамках реализации проекта «Репродуктор 2-го порядка бройлерного направления» было проведено исследование, учитывающее современные тенденции, как зарубежные, так и отечественные, в области проектирования и строительства животноводческих комплексов.
2. Исследование подтверждает, что эксплуатация объектов Репродуктора не оказывает существенного отрицательного воздействия на окружающую среду, включая атмосферный воздух и почвенный покров. Это достигается благодаря соблюдению всех нормативных требований, использованию современных технологий и систем, а также проведению регулярного мониторинга и контроля.
5. Исследование нацелено на формирование концепции эффективного и экологически устойчивого комплекса для индустриального птицеводства, охватывающего интеграцию современных строительных конструкций, материалов, инженерных систем и сооружений. Проектная разработка направлена на безусловный учет всех соответствующих нормативных требований и стандартов, что предполагает высокий уровень стандартизации и инновационности внедряемых технологических решений в целях достижения оптимальной экологической и технической устойчивости будущего птицеводческого комплекса.
6. При разработке проекта необходимо проведение анализа возможности использования базовых компонентов и материалов отечественного производства для обеспечения стабильного функционирования объектов промышленного птицеводства. Это может способствовать поддержке местного производства и устойчивости агропромышленного комплекса.
7. Данная работа может служить основой для разработки типовых решений по созданию проектной документации промышленных объектов в сфере птицеводства.

⁶ В Минсельхозе обсудили вопросы технологического суверенитета в АПК. 01.02.2024. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/v-minselkhoze-obsudili-voprosy-tehnologicheskogo-suvereniteta-v-apk/> (дата обращения: 02.02.2024).

Список литературы/ References

1. Буяров А.В., Буяров В.С. Функционирование и развитие рынка яиц и мяса птицы в контексте обеспечения продовольственной безопасности // Вестник аграрной науки. 2021. № 6 (93). С. 95–108 [Buyarov A.V., Buyarov V.S. Functioning and development of the market of eggs and poultry meat to ensure food security // Bulletin of agrarian science. 2021. No. 6 (93). P. 95–108]. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.6.95.
2. Кузьмин В.Н., Маринченко Т.Е. Снижение импортозависимости мясного птицеводства России // Техника и оборудование для села. 2023. № 2 (308). С. 45–48 [Kuzmin V.N., Marinchenko T.E. Decrease in import dependence of meat poultry farming in Russia // Machinery and equipment for rural area. 2023. No. 2 (308). P. 45–48]. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-2-45-48.
3. Войтюк М.М., Кондратьева О.В., Слинко О.В., Войтюк В.А. Строительство и модернизация животноводческих объектов – драйвер развития сельского хозяйства // Техника и оборудование для села. 2019. № 2. С. 26–33 [Voityuk M.M., Kondratieva O.V., Slinko O.V., Voityuk V.A. Construction and upgrading of livestock facilities: the driver of agricultural development // Machinery and equipment for rural area. 2019. No. 2. P. 26–33].
4. Бурчик В.В. Строительство и реконструкция животноводческих ферм // Строительство и природообустройство: сборник научных трудов. Выпуск 4. Благовещенск: Дальневосточный ГАУ. 2019. С. 18–25 [Burchik V.V. Construction and reconstruction of livestock farms // Construction and environmental management: collection of scientific papers. Issue 4. Blagoveshchensk: Far-Eastern GAU. 2019. P. 18–25].
5. Campbell E., Keefe G., Cullen S., Richmond A., Beagan S., Lavery U., McKenna B., Lester S. Research-by-design in complex systems: reflections on approaches used to reimagine environmentally sustainable, high-welfare poultry housing futures // Sustainability. 2023. No. 15 (7): 5808. DOI: 10.3390/su15075808.
6. Шаравьев П.В., Неверова О.П., Зуева Г.В., Романова А.С. Экологические основы птицеводства // Аграрный вестник Урала. 2013. № 7 (113). С. 47–49 [Sharavyev P.V., Neverov O.P., Zuyeva G.V., Romanova A.S. Ecological bases of poultry farming // Agrarian bulletin of the Urals. 2013. No. 7 (113). P. 47–49].
7. Bist R.B., Subedi S., Chai L., Yang X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 328: 116919. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116919.
8. Gržinić G., Piotrowicz-Cieślak A., Klimkowicz-Pawlas A., Górny R.L., Ławniczek-Wałczyk A., Piechowicz L., Olkowska E., Potrykus M., Tankiewicz M., Krupka M., Siebielec G., Wolska L. Intensive poultry farming: A review of the impact on the environment and human health // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 858, Part 3: 160014. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160014.
9. Паишева О.В., Умарова Н.Н., Исмаилова Р.Н., Горюнова С.М. Анализ отходов птицеводческого комплекса Республики Татарстан и оценка возможности их вторичного использования // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 13. С. 209–212 [Paisheva O.V., Umarova N.N., Ismailova R.N., Goryunova S.M. Waste analysis of the poultry complex of the Republic of Tatarstan and assessment of the possibility of their secondary utilization // Technological University Bulletin. 2015. Vol. 18. No. 13. P. 209–212].
10. Castellini C., Dal Bosco A. Animal Welfare and Poultry Meat in Alternative Production Systems (and Ethics of Poultry Meat Production) // Poultry Quality Evaluation. 2017. Chapter 14. P. 335–357. DOI: 10.1016/b978-0-08-100763-1.00014-3.
11. Rocchi L., Paolotti L., Rosati A., Boggia A., Castellini C. Assessing the sustainability of different poultry production systems: a multicriteria approach. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 211. P. 103–114. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.013.
12. Сулейманов А.М. Эффективные композиционные материалы строительного назначения // Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности: Сборник докладов научной конференции.

- М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. 2015. С. 14 [Suleymanov A.M. Effective composite materials for construction purposes // Polymer composite materials of new generation for civil engineering industries: Collection of reports of the scientific conference. Moscow: All-Russian Research Institute of Aviation Materials. 2015. P. 14].
13. Сулейманов А.М., Каюмов Р.А. Моделирование работы, старения и разрушения конструкционных полимерных композиционных материалов в условиях эксплуатации // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: VIII-й международный симпозиум, Тамбов. 2023. С. 409–410 [Suleymanov A.M., Kayumov R.A. Modeling of operation, aging and destruction of structural polymer composite materials under operating conditions // Actual problems of computer modeling of structures and buildings: VIII International Symposium, Tambov. 2023. P. 409–410].
 14. Singh P., Sheikh J., Behera B.K. Metal-faced sandwich composite panels: A review // Thin-Walled Structures. 2024. Vol. 195. 111376. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111376.
 15. Афонин К.В. Снижение капитальных затрат при строительстве зданий из сэндвич-панелей // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2020. № 2. С. 41–49 [Afonin K.V. Reduction of capital costs in sandwich panel construction of buildings // Transportation and Engineering in Western Siberia. 2020. No. 2. P. 41–49].
 16. Chinarov V.I., Tikhomirov A.I., Morozov N.M. The Concept of Technological Import Substitution and Modernization of Livestock in Russia // Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 283. P. 473–481. DOI: 10.1007/978-3-030-58823-6_53.
 17. Морозов Н.М. Направления технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства и эффективность их применения // Техника и оборудование для села. 2022. № 12 (306). С. 2–5. [Morozov N.M. Directions of technical progress in mechanization and automation of livestock farming and the effectiveness of their application // Machinery and equipment for rural area. 2022. No. 12 (306). P. 2–5]. DOI 10.33267/2072-9642-2022-12-2-5.
 18. Цындрина Ю. Развитие птицеводства: рост спроса и импортозамещение // Животноводство России. 2024. № 1. С. 12–14 [Tsyndrina Y.U. Poultry production development: increase in demand and import replacement // Livestock farming in Russia 2024. No. 1. P. 12–14].

Информация об авторах

Сибгатуллина Лейсан Шамилевна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: leiseb@mail.ru

Альбина Гомеровна Хабибулина, кандидат экономических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: albgomer@mail.ru

Сибгатуллин Айрат Маратович, главный инженер, ООО «ПЦ Град», г. Казань, Российская Федерация

Email: air-sib@yandex.ru

Information about the authors

Leysan Sh. Sibgatullina, candidate of technical sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: leiseb@mail.ru

Albina G. Khabibulina, candidate of economic sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: albgomer@mail.ru

Ayrat M. Sibgatullin, chief engineer, LLC «PTs Grad», Kazan, Russian Federation

E-mail: air-sib@yandex.ru



УДК: 624.159.11

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10

EDN: LPZYFO



Влияние конструкции фундамента и грунтового основания на снижение уровня вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена

Илизар Т. Мирсаяпов¹, Р.Р.Хасанов¹, Д.Р.Сафин¹, Д.М. Нуриева¹
¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Строительство тоннелей метрополитена в условиях стеснённой городской застройки является источником техногенного риска для существующих и вновь проектируемых зданий и сооружений. В свою очередь, строительство новых зданий может негативно отразиться на условиях эксплуатации конструкций метрополитена. В связи с этим, при проектировании зданий и сооружений в зоне прохождения линий метро необходимо проводить комплексную оценку их взаимовлияния. Цель работы заключается в геотехническом прогнозе влияния метрополитена на проектируемое здание в г.Казани и здания на метрополитен. Задачами исследования являются: выбор наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела, и расчет основания фундамента проектируемого здания по деформациям с учетом вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена.

Результаты. Подобранные расчетами конструктивное решение основания и фундамента проектируемого здания, предусматривающее устройство плитного фундамента по уплотненной подушке из щебня мощностью 1000 мм, позволяет снизить уровень вибраций от движения поездов метрополитена до допустимых пределов, предусмотренных санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что рекомендованные в данной статье подходы к расчетам и полученные результаты для конкретного сооружения могут быть использованы при разработке мероприятий, снижающих негативное взаимовлияние вновь проектируемых зданий и метрополитена.

Ключевые слова: основание, циклическая нагрузка, вибрационное воздействие, метрополитен, фундамент, щебеночная подушка

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р., Нуриева Д.М. Влияние конструкции фундамента и грунтового основания на снижение уровня вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.96-106, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10, EDN: LPZYFO

Influence of the foundation and soil structure on reducing the level of vibrations arising from the movement of metro trains

Iizar T. Mirsayapov¹, R.R. Khasanov¹, D.R. Safin¹, D.M. Nurieva¹
¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The metro tunnels construction in conditions of cramped urban development is a technogenic risk source for existing and newly designed buildings and structures. In turn, the construction of new buildings may negatively affect the operating conditions of metro structures. In this regard, when designing buildings and structures in the

area of metro lines, it is necessary to carry out a comprehensive assessment of their mutual influence. The purpose of the work is a geotechnical forecast of the influence of the metro on the designed building in Kazan and the influence of the building on the metro. The objectives of the study are the selection of the most optimal design of the foundation and soil base, which allows reducing the level of vibrations on the surface of the foundation from the influence of the movement of metro trains to the permissible limit, and calculation of the base of the foundation of the designed building based on deformations, taking into account the vibration impact from the movement of metro trains.

Results. The design solution for the base and foundation of the designed building, selected by calculations, providing for the installation of a slab foundation on a compacted layer of crushed stone with a thickness of 1000 mm, makes it possible to reduce the level of vibrations from the movement of metro trains to the permissible limits provided for by sanitary standards SN 2.2.4-2.1.8.566-96.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that the approaches to calculations recommended in this article and the results obtained for a specific structure can be used in the development of measures that reduce the negative mutual influence of newly designed buildings and the metro.

Keywords: base, cyclic load, vibration impact, metro, foundation, crushed stone layer

For citation: Mirsayapov Iizar T., Khasanov R.R., Safin D.R, Nurieva D.M. Influence of the foundation and soil structure on reducing the level of vibrations arising from the movement of metro trains // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.96-106, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10, EDN: LPZYFO

1. Введение

На сегодняшний день отсутствует единая система учета и прогнозирования влияния микросейсмических колебаний на основания зданий, тогда как общеизвестно, что у домов, находящихся по линии метро, постепенно деформируется фундамент. Определенные подходы к решению данной задачи рассмотрены в работах [1-3]. В то же время, застройка в охранной зоне метрополитена может оказать существенное влияние на эксплуатацию подземного сооружения. Это влияние в основном выражается в дополнительных деформациях конструкций метрополитена, трещинах, повреждениях обделки тоннелей, изменении режима подземных вод и т.д. [4-6]. Для избегания указанных негативных последствий, уже на стадии проектирования зданий в охранной зоне метро необходимо выполнить геотехнический прогноз влияния нового строительства на существующие конструкции тоннелей метро, что описано в работах [7-9]. Как следует из вышеизложенного, целью проведения исследований является геотехническое прогнозирование взаимовлияния метрополитена на проектируемое здание и здания на метрополитен с учетом значений виброускорений, возникающих на поверхности фундамента.

При проведении исследований решалось 2 задачи:

- динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» с целью выбора наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела;
- расчет основания фундамента проектируемого здания по деформациям с учетом вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена и оценка влияния фундамента здания на конструкции метрополитена.

2. Материалы и методы

Проведенный анализ снижения эксплуатационной надежности подземных сооружений [1, 2] показывает острую необходимость проведения оценки взаимного влияния подземных и наземных объектов при осуществлении нового строительства. Рассматриваемый в рамках данных исследований проектируемый объект находится в г.Казани и имеет трапецевидную форму в плане размерами 14,7 × 16,4м.

Конструктивная схема здания – каркасная. Фундамент под всем зданием сплошной плитный из монолитного железобетона. Здание расположено непосредственно над действующей линией метрополитена. Характерный инженерно-геологический разрез представлен на рис.1.

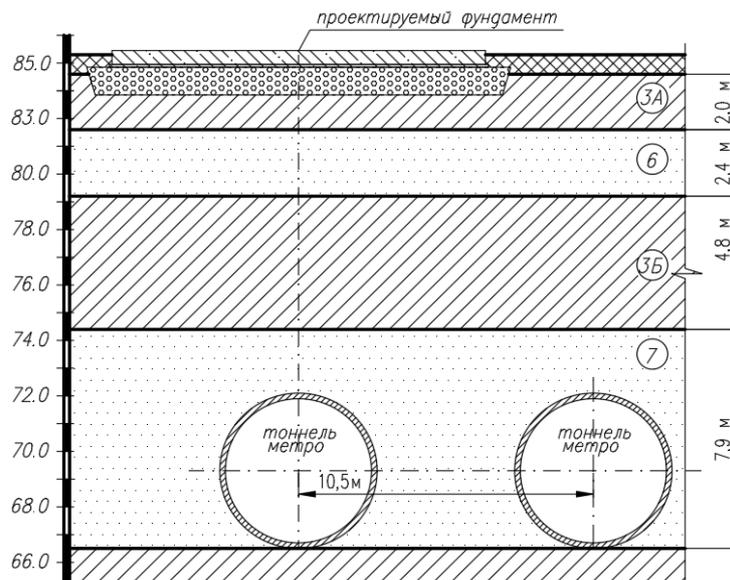


Рис.1. Характерный инженерно-геологический разрез (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Typical engineering-geological section (illustration by the authors)

Согласно результатам измерений уровня вибрации над линией метро на месте строительства объекта, уровень вибраций на поверхности земли превышает допустимые пределы, требуемые Санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96. Превышения виброускорений на поверхности земли получены в октавных полосах частот 31,5 и 63 Гц. Большой уровень вибраций отмечен на октавной полосе 63 Гц.

Характеристики грунта в основании фундаментов, принятые в расчет, представлены в табл.1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

№№ ИГЭ	Номенклатурный вид грунта	Плотность грунта, ρ , т/см ³	Угол внутреннего трения, φ , град.	Удельное сцепление, c , кПа	Модуль деформации, E , МПа
3а	Суглинок твердый, полутвердый	1,87	22	20	13
		2,00	21	15	11
3б	Суглинок тугопластичный	1,90	20	17	10
		1,98	19	13	9
6	Песок мелкий маловлажный	1,80	30	1,8	30
		2,05	27	1,4	26
7	Песок средней крупности маловлажный	1,79	32	1,2	36
		2,09	28	0,8	34

Примечание: в таблице над чертой даны характеристики грунтов при природной влажности, под чертой – в водонасыщенном состоянии.

Максимальные значения уровня вибраций по оси Z составили 100 дБ (превышение 9 дБ), по оси Y – 99 дБ (превышение 8 дБ). Для приведения уровней вибрации до допустимых значений необходимо предусмотреть мероприятия по уменьшению колебаний фундамента проектируемого здания.

Геотехнический прогноз деформирования грунтового основания фундамента проектируемого здания при действии вибраций от движения поездов метрополитена выполнялся численным путем [6, 9, 10].

Динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» и выбор конструкции фундамента и грунтового основания производился исходя из условий [5-7]:

$$a \leq a_u, \quad (1)$$

$$L_a \leq L_{a,u}, \quad (2)$$

где a – значения уровней виброускорения на поверхности фундамента (м/с^2),
 a_u – значения уровней виброускорения, допустимые требованиями Санитарных норм СН 2.2.4-2.1.8.566-96;
 L_a – логарифмический уровень виброускорения (дБ):

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{1 \cdot 10^{-6}}; \quad (3)$$

L_{au} – предельно допустимое значение уровня вибрации (в дБ).

Расчет оснований по деформациям для проектируемого здания, расположенного в зоне влияния метро, производился из условия:

$$S \leq S_u, \quad (4)$$

где S – осадка основания фундамента, определяемая численными исследованиями с учетом воздействия вибраций от работы метрополитена;
 S_u – предельное значение осадки основания фундамента.

Осадка основания фундамента представлена в виде:

$$S = S_{ст} + S_{вibr}, \quad (5)$$

где $S_{ст}$ – осадка фундамента от статических нагрузок, может быть определена методом послойного суммирования;

$S_{вibr}$ – осадка фундамента от вибрационного воздействия метрополитена.

Динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» проводился с целью выбора наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела.

Расчет производился в структуре программы ЛИРА-САПР с использованием модуля «Динамика плюс», реализующего прямое интегрирование уравнений движения во времени с применением модифицированного метода центральных разностей. Система уравнений движения (динамического равновесия) имеет вид:

$$M\ddot{\bar{y}}(t) + C\dot{\bar{y}}(t) + K\bar{y}(t) = \bar{P}(t), \quad (6)$$

где M, C, K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы;

$\bar{y}''(t), \bar{y}'(t), \bar{y}(t)$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений в момент времени t ;

$\bar{P}(t)$ – нагрузка, соответствующая времени t .

Используя зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{y}''(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) - 2\bar{y}(t) + \bar{y}(t - \Delta t)}{2\Delta t^2}, \\ \bar{y}'(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) - \bar{y}(t - \Delta t)}{2\Delta t}, \\ \bar{y}(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) + \bar{y}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (7)$$

выражение (6) приводится к разрешающему уравнению вида:

$$\left[\frac{2M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K \right] (\bar{y}(t + \Delta t) + \bar{y}(t - \Delta t)) = 2 \left(\bar{P}(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} \bar{y}(t) + \frac{C}{\Delta t} \bar{y}(t - \Delta t) \right), \quad (8)$$

где Δt – приращение времени для каждого нового шага интегрирования.

После решения уравнения (8) определяются перемещения на каждом шаге интегрирования и, затем, используя выражения (7), вычисляются соответствующие ускорения и скорости масс системы [11-13]. На основании полученных результатов могут быть построены графики изменения перемещений, скоростей и ускорений от заданной динамической нагрузки в любой точке пространства (рис. 2) в заданном интервале времени [14,15].

Прежде чем произвести оценку уровня колебаний на поверхности фундамента проектируемого здания предварительно была создана «эталонная» расчетная модель

массива грунта строительной площадки с учетом существующих конструкций метрополитена (рис. 3). На основе этой модели была подобрана вынуждающая нагрузка от движения поездов, создающая на поверхности грунта уровни виброускорений, равные тем, что были замерены реально на площадке строительства. Превышение виброускорений на поверхности земли получены в октавных полосах частот 31,5 и 63 Гц. Большой уровень вибраций отмечен на октавной полосе 63 Гц. Так в точке замера т.1 (рис. 3) уровень вибраций по оси Z составил 100 дБ (превышение 9 дБ), по оси Y – 99 дБ (превышение 8 дБ). Эти данные были взяты в качестве «эталонных» для моделирования динамического воздействия метрополитена.

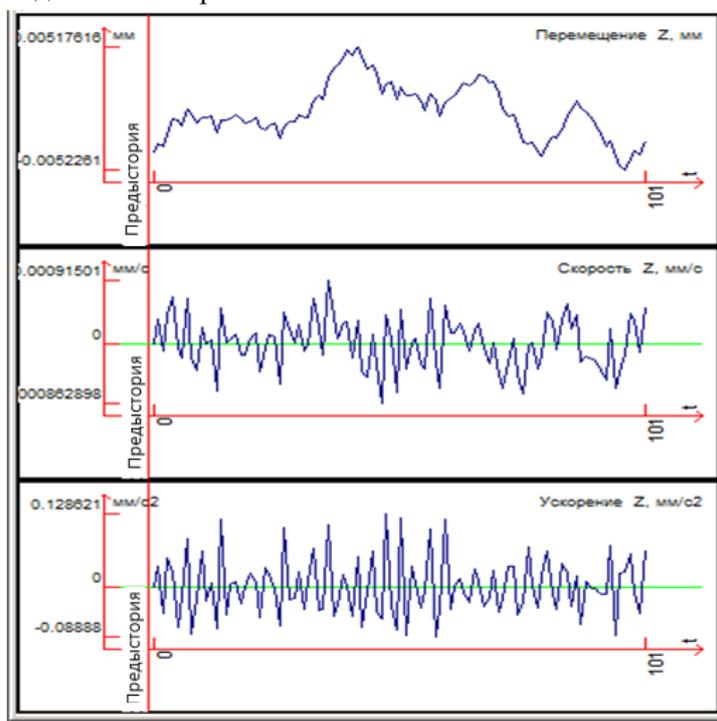


Рис. 2. Характерные графики изменения перемещений, скоростей и ускорений (иллюстрация авторов).

Fig. 2. Typical graphs of changes in displacements, speeds and accelerations (illustration by the authors)

Динамическая нагрузка от движения поездов метрополитена была задана в виде сосредоточенных сил, изменяющихся по гармоническому закону:

$$P(t) = P_0 \sin \theta \cdot t, \tag{9}$$

где P_0 – максимальное амплитудное значение вибрационной нагрузки;

θ – круговая частота вынуждающей нагрузки принималась равной 395,64 рад/сек, что соответствует октавной частоте 63 Гц.

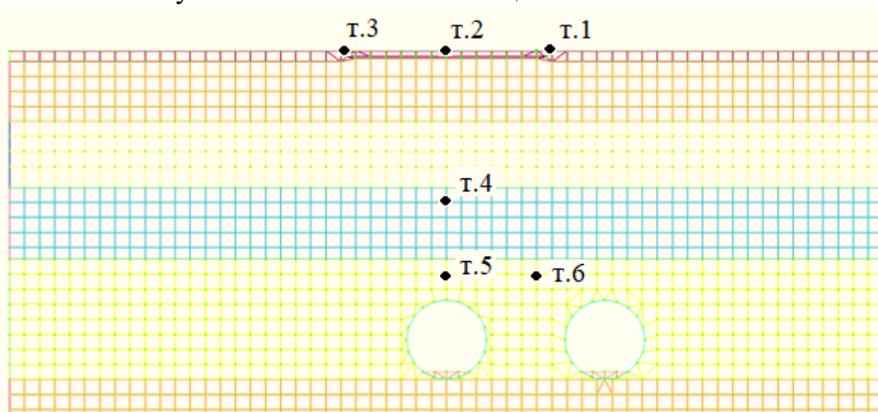


Рис. 3. Схема расположения расчетных точек (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Layout of design points (illustration by the authors)

Динамические силы прикладывались в точках расположения рельсовых путей метрополитена. При этом рассматривался наиболее неблагоприятный случай одновременного воздействия двух встречных составов [1]. Время воздействия нагрузки на участок шириной 1 м принят равным 3,5 сек, исходя из средней скорости поезда метрополитена $72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с}$ и длины состава 70 м.

При действии динамических нагрузок вибрационного характера наблюдается линейная зависимость между динамическими силами, приложенными к системе, и ее динамическими перемещениями. Поэтому в расчетной модели грунт рассматривался как упругая среда. Демпфирующие свойства грунтов учитывались коэффициентом поглощения энергии, принятым согласно рекомендациям СП 23-105-2004 и [7, 9].

Максимальные расчетные ускорения колебаний грунта приводятся для точки т. 1:

– по оси Z: $y_z^{\text{max}} = 0,1 \text{ м/с}^2$ (100 дБ) (фактические значения по результатам замеров $0,1 \text{ м/с}^2$);

– по оси X: $y_x^{\text{max}} = 0,08 \text{ м/с}^2$ (98,06 дБ) (фактические значения по результатам замеров $0,079 \text{ м/с}^2$).

При использовании созданной расчетной модели (с заданными характеристиками грунта, граничными условиями и условиями приложения нагрузки) в расчетной точке т. 1 получены виброускорения, на 100 % совпадающие с результатами фактических замеров, что позволяет сделать вывод о возможности использования разработанной «эталонной» модели в дальнейших исследованиях для выбора наиболее оптимального вида фундамента и основания проектируемого здания.

3. Результаты и обсуждение

При проведении численных исследований были рассмотрены следующие варианты устройства фундамента и основания проектируемого здания:

1. Плитный фундамент толщиной 500 мм на естественном основании.
2. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством демпфирующей подушки из щебня толщиной 500 мм.
3. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством комбинированной демпфирующей подушки (500 мм щебня и 500 мм песка средней крупности).
4. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством демпфирующей подушки только из щебня толщиной 1000 мм.

Выбор конструктивного решения осуществлялся исходя из выполнения условий (1) и (2). Предельно допустимые значения виброускорений на поверхности фундамента для октавной полосы 63 Гц приняты согласно СН 2.2.4-2.1.8.566-96 и составляют $0,035 \text{ м/с}^2$ (91 дБ).

Вибрационная нагрузка от движения поездов метрополитена задана в виде гармоника в октавной полосе 63 Гц (395 рад/сек), принятой на основе «эталонной» модели.

Для учета сил затухания, возникающих в системе «здание-фундамент-основание», в расчете были учтены коэффициенты демпфирования c :

$$c_i = o \cdot 2m_i \cdot \omega, \quad (10)$$

где ξ – параметр затухания, принимаемый равным $\xi = \delta / 2\pi$;

δ – логарифмический декремент колебаний: принимается для железобетонных конструкций (плитного фундамента) равным 0,3; для грунтов – $\delta = \psi / 2$,

где ψ – коэффициент поглощения энергии: для подушки из щебня и песка средней крупности принят равным 0,1;

m_i – масса сосредоточенная в i -ом узле;

ω – частота собственных колебаний системы.

При оценке горизонтальных колебаний грунта в качестве расчетной принималась частота $\omega_1 = 17,648 \text{ рад/сек}$. Соответственно, коэффициенты демпфирования:

– для фундамента из железобетона $\xi = 0,048$ и $c_i = 1,694m_i$;

– для подушки из щебня и песка $\xi = 0,00796$ и $c_i = 0,28m_i$.

При оценке вертикальных колебаний грунта в качестве расчетной принималась частота $\omega_2 = 141,395$ рад/сек (получены расчетом на собственные колебания в расчетном комплексе). Соответственно, коэффициенты демпфирования:

- для фундамента из железобетона $\xi = 0,048$ и $c_i = 13,57m_i$;
- для подушки из щебня и песка $\xi = 0,00796$ и $c_i = 2,251m_i$.

Результаты численных исследований влияния конструктивного решения фундамента и основания проектируемого здания на уровень вибраций приведены для расчетов в октавной полосе частот 63 Гц.

Максимальные значения виброускорений по вертикали $y_z^{n\max}$ для вариантных решений 1÷3 составили $0,0361 \div 0,0588$ м/с² (91,15÷95,4 дБ), что превышает предельное значение 91 дБ и не удовлетворяет требованиям норм.

В конструктивном решении 4 приняты следующие характеристики материалов фундамента и демпфирующей подушки:

- плитный фундамент толщиной 500 мм, бетон класса В20;
- бетонная подготовка 100 мм класса В7,5;
- подушка из щебня толщиной 1000 мм (в уплотненном состоянии модуль деформации не менее $E = 50$ МПа, плотность не менее 2 т/м³, коэффициент Пуассона 0,3).

График изменения ускорений для данного конструктивного решения в точке т.1 представлен на рис. 4.

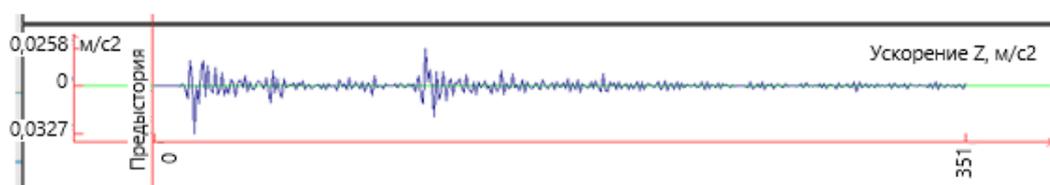


Рис. 4. График виброускорений на поверхности фундамента по оси Z (иллюстрация авторов).

Fig. 4. Graph of vibration accelerations on the foundation surface along the Z axis (illustration by the authors)

Максимальные значения виброускорений на поверхности фундамента по вертикали и горизонтали составили $y_z^{n\max} = 0,0327$ м/с² (90,3 дБ), $y_x^{n\max} = 0,0082$ м/с² (79 дБ), что не превышает допустимых пределов (91 дБ). Конструктивное решение удовлетворяет требованиям санитарных норм.

Проверка конструктивного решения 4 расчетом также была выполнена для вибраций в октавной полосе частот 31,5 Гц. Полученные значения виброускорений колебаний грунта по вертикали и горизонтали не превысили допустимых пределов (91 дБ).

Осадка грунтового основания на действие вибрационной нагрузки от воздействия метрополитена принималась в виде циклической нагрузки, передаваемой от плитного фундамента на грунты основания. Максимальное количество циклов нагружения было принято $2 \cdot 10^6$. Вибрационная нагрузка в пределах одного цикла нагружения принималась равной:

$$P_{\text{вibr}} = p_{\text{ср}} \frac{y''}{g}, \quad (11)$$

где $p_{\text{ср}}$ – среднее давление под подошвой фундамента.

Минимальная нагрузка цикла: $P_{\text{min}} = p_{\text{ср}}$, Максимальная нагрузка цикла: $P_{\text{max}} = P_{\text{min}} + P_{\text{вibr}}$.

Расчет осадок грунтового основания на действие вибрационной нагрузки от воздействия метро производился с учетом деформаций виброползучести грунта [6, 13, 15, 16]. Деформация виброползучести грунта на i -ом цикле нагружения определялась по формуле:

$$\varepsilon_{pi} = P_{\text{max}} \frac{1}{E_0} f(N_i), \quad (12)$$

где $f(N_i)$ – функция роста деформаций виброползучести для i -го цикла нагружения в момент времени t (сут):

$$f(N_i) = 1 - e^{-\gamma(t_i - t_0)}, \quad (13)$$

где γ – коэффициент скорости затухания деформаций ползучести: для грунта принят $\gamma=0,004$.

Осадка от действия вибрационной нагрузки на i -ом цикле нагружения с учетом накопленных деформаций виброползучести грунта:

$$S_{\text{вibr}_i} = \varepsilon_{pl_i} \cdot H_c, \quad (14)$$

где H_c – мощность сжимаемой толщи грунта от нагрузки P_{max} .

Как показали результаты расчетов, общая осадка основания фундаментов с учетом действия вибрационной нагрузки не превышает предельно допустимых значений. Мощность сжимаемой толщи грунтов от уровня низа подушки из щебня составляет не более 5,45 м. Граница сжимаемой толщи грунтов расположена на глубине 6,9 м относительно поверхности земли.

Дополнительно были проведены численные исследования деформаций грунтового основания в программном комплексе ЛИРА с использованием модуля «Монтаж», позволяющего учесть историю нагружения площадки строительства, включая стадии разработки котлована, устройства щебеночной подушки, устройства фундамента, передачи нагрузки от здания и вибрации метрополитена.

Характерная картина деформирования массива грунта от заданных нагрузок, полученная расчетом, показана на рис. 5.

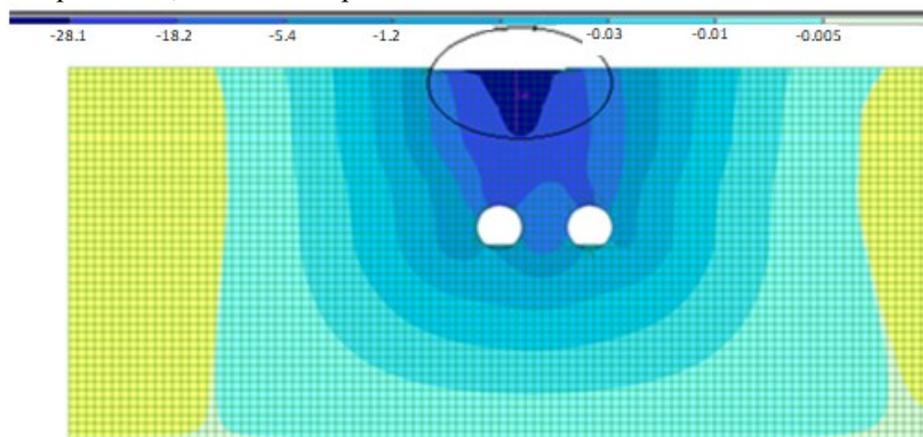


Рис. 5. Вертикальные перемещения по Z, мм (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Vertical movements along Z, mm (illustration by the authors)

Анализ результатов расчета показал, что мощность сжимаемой толщи грунтов от веса проектируемого здания с учетом подушки из щебня не превышает 7,5 м, что близко к значениям, полученным ручным методом (6,9 м), а также достаточно хорошо согласуется с результатами исследований других авторов [1, 6, 8, 17]. Таким образом, по результатам расчетов тоннели метро расположены за пределами сжимаемой толщи и не попадают в зону влияния здания.

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с данными, приведенными в работах авторов в данной области [1 - 3, 5]. Полученные данные являются подтверждением того, что конструкция фундаментов и искусственного основания оказывают существенное влияние на уровень вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена, за счет своих демпфирующих способностей.

4. Заключение

На основании выполненных исследований по геотехническому прогнозу можно сделать следующие общие выводы:

1. Конструктивное решение основания и фундамента проектируемого здания, предусматривающее устройство плитного фундамента толщиной 500 мм из бетона класса В20 с устройством бетонной подготовки толщиной 100 мм и уплотненной подушки из щебня мощностью 1000 мм, позволяет снизить уровень вибраций от движения поездов

метрополитена до допустимых пределов, предусмотренных санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96. Максимальные значения виброускорений колебаний грунта в октавной полосе частот 31,5 Гц, полученные расчетом с учетом коэффициента запаса по нагрузке от движения поездов метрополитена 1,2, составляют 84,86 дБ и не превышают допустимого значения 85 дБ (СН 2.2.4-2.1.8.566-96). Максимальные значения виброускорений колебаний грунта в октавной полосе частот 63 Гц составляют 90,3 дБ и также не превышают предельно допустимого значения 91 дБ.

2. Выполненные расчеты деформаций грунтового основания фундаментов исследуемого здания показали, что его максимальные прогнозные деформации с учетом вибрационного воздействия поездов метрополитена при применении уплотненной подушки из щебня мощностью 1000 мм составляют 0,077 м, что существенно меньше предельной величины $S_u=0,15$ м. Следовательно, влияние метро на прогнозную величину деформаций грунтового основания фундамента проектируемого здания не превышает допустимых пределов.

3. Выполненные расчеты деформаций грунтового основания фундамента проектируемого здания показывают, что мощность сжимаемой толщи грунтов от уровня низа щебеночной подушки составляет не более 5,45 м. Граница сжимаемой толщи грунтов расположена на глубине 6,9 м относительно поверхности земли. Тоннели метрополитена расположены ниже границы сжимаемой толщи грунтов основания и не попадают в зону влияния проектируемого здания.

Список литературы/ References

1. Лебедев М.О., Романевич К.В., Басов А.Д. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации // “Геотехника”. 2018. Т. X. № 1-2/2018. С.82-89. EDN URPUAW [Lebedev M.O., Romanovich K.V., Basov A.D. Assessment of the mutual influence of underground metro structures during construction and operation // “Geotechnics”. 2018. No. 1-2/2018. P.82-89. EDN URPUAW].
2. Панжин А.А., Панжина Н.А. Деформационный мониторинг воздействия строительства метрополитена на здания и сооружения // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды VI Международной конференции, – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 4-10. – EDN PDXMRK [Panzhin A.A., Panzhina N.A. Deformation monitoring of the impact of subway construction on buildings and structures // Design, construction and operation of complexes of underground structures: Proceedings of the VI International Conference, - Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2019. - P. 4-10. – EDN PDXMRK].
3. Khuziakhmetov R., Nurieva D. Determination of the Reasons for the Fall of Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Kazan, Russia, 2020. V. 890 № 162304. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012136
4. Mirsayapov I.T., Khasanov R.R., Safin D.R. Ensuring the stability of the deep pit enclosure and foundation bases in the conditions of reconstruction of the architectural monument in the city of Kazan: 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021) – E3S Web of Conferences Volume 274 (2021), Kazan, 21–28 April 2021. Vol. 274. P. 3022. DOI 10.1051/e3sconf/202127403022.
5. Yuldashev Sh.S., Karabaeva M.U. Soil surface vibrations in the training of metro trains in parallel tunnels // Theoretical & Applied Science. – 2020. – No. 5(85). – P. 117-121. – DOI 10.15863/TAS.2020.05.85.24. – EDN FNNYQW.
6. Анфилатов Н. А. Аспекты негативного воздействия вибрации на здания и сооружения и людей, находящихся в них // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2. – С. 17-21. – EDN FYATCC [Anfilatov N. A. Aspects of the negative impact of vibration on buildings and structures and the people in them // Chemistry. Ecology. Urbanism. – 2019. – Vol. 2. – P. 17-21. –EDN FYATCC].

7. Дашевский М.А., Мондрус В.Л., Моторин В.В. Концепция виброзащиты зданий и сооружений в поле строительных нормативов РФ // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 109-115. – DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-109-115. – EDN SRBZAD [Dashevsky M.A., Mondrus V.L., Motorin V.V. The concept of vibration protection of buildings and structures in the field of construction standards of the Russian Federation // Academia. Architecture and construction. – 2018. – No. 4. – P. 109-115. – DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-109-115. – EDN SRBZAD].
8. Павлов П.Д. Общие тенденции в освоении подземного пространства городов. Методы уменьшения влияния от строительства в условиях плотной существующей застройки // Метро и тоннели. – 2021. – № 1. – С. 38-41. – EDN AHSKBW [Pavlov P.D. General trends in the development of underground space in cities. Methods for reducing the impact of construction in conditions of dense existing buildings // Metro and tunnels. – 2021. – No. 1. – P. 38-41. – EDN AHSKBW].
9. Мондрус В. Л., Митрошин В. А. Воздействие движения поездов метрополитена неглубокого заложения на городскую застройку // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 9. – С. 14-20. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.14-20. – EDN MQTYKD [Mondrus V.L., Mitroshin V.A. Impact of shallow subway train traffic on urban development // Industrial and Civil Construction. – 2020. – No. 9. – P. 14-20. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.14-20. – EDN MQTYKD].
10. Кузина Е.С. Оценка технического состояния сооружений московского метрополитена, попадающих в зону влияния строительства // Университетская наука. – 2016. – № 1(1). – С. 78-82. – EDN WAWTKV [Kuzina E.S. Assessment of the technical condition of Moscow metro structures falling within the zone of influence of construction // University Science. – 2016. – No. 1(1). – P. 78-82. – EDN WAWTKV].
11. Dong Y., Burd H. J., Houlsby G. T. Finite element study of deep excavation construction processes // Soils and Foundations. 2017. № 6 (57). P. 965–979.
12. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E. Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation // International Journal of Advanced Structural Engineering. 2019. № 1 (11). P. 21–30.
13. Liang R. Simplified analytical method for evaluating the effects of overcrossing tunneling on existing shield tunnels using the nonlinear Pasternak foundation model // Soils and Foundations. 2019. 6(59) P. 1711-1727.
14. Zhao L., Zujiang L., Chenghua X., Jinzhong T. 3D fluid-solid full coupling numerical simulation of soil deformation induced by shield tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. V. 90. P. 174–182.
15. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Clay Soil Deformations Under Regime Long-Term Triaxial Compression Taking into Account Initial Defects // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. № 291. P. 99–108.
16. Shakirov, I. Bearing capacity of piles in a reinforced by pressure cementation soil massif / I. Shakirov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April, 21–28, 2021. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3023. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403023. – EDN VXLBAT.
17. Siraziev, L. Experimental studies of the various soils bedding influence on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation / L. Siraziev, D. Sergeev // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April, 21–28, 2021. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3021. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403021. – EDN XXKBPC.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илизар Талгатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Хасанов Рубис Раисович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Сафин Даниль Ринафович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: d.safin@list.ru

Нуриева Дания Мансуровна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: danm_n@mail.ru

Information about the authors

Изар Т. Mirsayapov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Rubis R. Khasanov, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Danil R. Safin, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: d.safin@list.ru

Daniya M. Nurieva, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: danm_n@mail.ru



УДК: 69.05, 691.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11

EDN: OJRGGB

Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства

Р.Х. Мухаметрахимов¹, Л.В. Зиганшина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Необходимость повышения эффективности контроля качества сырьевых смесей и печатаемых изделий на их основе, устранения выявленных недостатков с целью получения качественной строительной продукции невозможны без определения видов возникающих дефектов, повреждений и несоответствий бетонов в технологии аддитивного строительного производства, что обуславливает актуальность решаемой проблемы. Цель исследований – разработать классификацию дефектов бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати). Задачи исследований – осуществление контроля качества напечатанных на 3D-принтере образцов из бетонных и растворных смесей визуальным и измерительным методами, выявление дефектов, установление причин их возникновения, разработка определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства.

Результаты. Разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологиях аддитивного производства в строительстве, учитывающая их образование в процессе формования, твердения и эксплуатации. Полученные результаты рекомендованы для применения в документации всех видов научно-технической, учебной и справочной литературе в области аддитивного строительного производства.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в обеспечении единства терминологии дефектов бетонов и растворов, возникающих в технологии аддитивного строительного производства (3D-печати), возможности оперативно и объективно выявлять их дефекты при 3D-печати и принимать решение по их устранению (при необходимости), повышении качества строительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, бетоны, растворы, контроль качества, дефекты

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 107-116, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11, EDN: OJRGGB

Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP)

R.Kh. Mukhametrakhimov¹, L.V. Ziganshina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The need to increase the efficiency of quality control of raw mixtures and printed products, to eliminate identified deficiencies in order to obtain high-quality construction products is impossible without identifying the types of defects that arise, damage and inconsistencies of concrete in 3D concrete printing (3DCP), which determines the relevance of the problem being solved. The purpose of the research is to develop a classification of defects

in concrete and mortars formed during 3DCP. The objectives of the research are to carry out quality control of 3D-printed samples from concrete and mortar mixtures using visual and measuring methods, identify defects, establish the causes of their occurrence, develop definitions and symbols of defects and concrete and mortars based on mineral binders in additive construction technology.

Results. The classification of defects, definitions and symbols of defects in concrete and mortars based on mineral binders in 3DCP has been developed, taking into account their formation during the process of molding, hardening and operation. The results obtained are recommended for use in documentation of all types of scientific, technical, educational and reference literature in the field of additive construction manufacturing.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to ensure the unity of terminology for defects in concrete and mortars that arise in 3DCP, the ability to quickly and objectively identify their defects during 3D printing and make decisions to eliminate them (if necessary), improving the quality of construction products.

Keywords: additive construction manufacturing, 3D printing, concrete, mortars, quality control, defects

For citation: Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina, L.V. Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP) // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 107-116, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11, EDN: OJRGGGB

1. Введение

Применение технологии 3D-печати в строительной отрасли имеет огромный потенциал [1–3] в связи с автоматизацией процессов строительства, возможностью создания изделий и конструкций различной геометрической формы без использования опалубки [4], значительным сокращением сроков строительства и трудозатрат [5–7]. Данная технология успешно применяется при создании строительной продукции различного назначения [8] – от отдельных элементов зданий и сооружений до крупномасштабных комплексов зданий и сооружений [9–11].

При наличии большого числа преимуществ стоит отметить, что технология строительной 3D-печати – сложный метод, требующий сочетания знаний материаловедения и производственного процесса [12]. Кроме того, данный метод требует постоянного мониторинга процесса для обеспечения высокого качества создаваемой продукции.

Одной из центральных проблем в технологии строительной 3D-печати являются применяемые сырьевые смеси (на цементном, гипсовом и смешанном вяжущих), к которым предъявляются особые требования – необходимость обеспечения высокой формоустойчивости, формуемости, жизнеспособности и др. [13–15]. Данной проблеме посвящены различные работы [16–18], в которых приведены результаты исследований свойств смесей на минеральных вяжущих [19–21], адаптированных для данной технологии. Большое количество исследований на данную тему продолжается и по настоящее время.

Помимо неадаптированности сырьевых смесей, немаловажной проблемой является организация и осуществление системы контроля качества при аддитивном производстве строительной продукции методом 3D-печати [12,22]. Ввиду того, что экструзия является динамическим процессом, при выдавливании 3D-принтером смесь испытывает сдвиговые нагрузки, под воздействием которых она приобретает ту или иную вязкость. Бесконтрольное изменение в процессе экструзии реологических характеристик смеси может приводить к ухудшению качества строительной продукции – появлению различных дефектов, повреждений и несоответствий печатаемых изделий.

Авторами в работе [12] предложен способ регулирования скорости экструзии и поддержания заданного значения во время 3D-печати. Данный способ учитывает параметры печати, реологические свойства цементных смесей и позволяет поддерживать экструзию в определенном диапазоне со средней долей ошибок 6,7 %.

Для контроля свойств бетонной смеси при экструзии авторами работы [9] разработан автоматизированный интегрированный прибор «датчик-принтер» с многофункциональными возможностями проведения испытаний на пластическую прочность, сжатие, сдвиг и растяжение в процессе 3D-печати. Разработанная система интегрирована с 3D-принтером и управляется с главной станции. Данная разработка позволяет определять характеристики смеси для возможности наращивания печатаемых слоев и может быть признана эффективным способом контроля качества смеси.

Авторами в работе [23] разработана конструкция сопла 3D-принтера с изменяемой геометрией, которое может напрямую контролировать геометрию экструдата в процессе печати на каждом слое. Конструкция узла имеет регулируемую геометрию выпускного отверстия, которой можно управлять в ходе процесса.

Для обнаружения дефектов бетона при экструзии авторами в работе [24] предлагается методика компьютерного сканирования, которая включает следующую последовательность основных операций – получение изображений; межслоевая нарезка линий и слоев; определение характеристик геометрии и текстуры слоев; обнаружение дефектов. Получение изображения осуществляется с помощью камеры, прикрепленной к печатному соплу. Предлагаемый метод распознает и находит линии, разделяющие напечатанные слои с точностью 91%. Текстура материала классифицируется по четырем классам качества.

Однако стоит отметить, что автоматизация контроля качества сырьевых смесей и печатаемых изделий на их основе, устранение выявленных недостатков с целью получения качественной строительной продукции невозможны без определения видов возникающих дефектов, повреждений и несоответствий бетонов в технологии аддитивного строительного производства, что обуславливает актуальность данной работы.

Цель работы – разработать классификацию дефектов бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати).

Задачи исследования:

1. Осуществление контроля качества напечатанных на 3D-принтере образцов из бетонных и растворных смесей визуальным и измерительным методами.
2. Выявление дефектов, установление причин их возникновения, разработка определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства.

Объект исследований – бетонные и растворные смеси, изделия и конструкции, напечатанные на строительном 3D-принтере.

Предмет исследований – дефекты, повреждения, несоответствия бетонов и растворов, образующихся при аддитивном строительном производстве (3D-печати).

2. Материалы и методы

Определение дефектов выполнялось в период с 2019 по 2024 гг. в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета при выполнении экспериментальных исследований, аддитивного строительного производства изделий и конструкций.

3D-печать образцов из сырьевой смеси осуществлялась методом послойной экструзии на порталном цеховом строительном 3D-принтере «АМТ S-6044» (ООО «СПЕЦАВИА», г. Ярославль), посредством ее печати по заранее разработанной трехмерной цифровой модели (G-code).

Контроль качества напечатанного на 3D-принтере изделия для идентификации дефектов включал в себя визуальный и измерительный методы. Измерительный контроль произведен с использованием металлической линейки по ГОСТ 427-75, металлической рулетки по ГОСТ 7502-98, штангенциркуля ШЦ-1-150-0.1 по ГОСТ 166-89, увеличительной лупы по ГОСТ 25706-83, лазерного дальномера Leica D210, лазерного уровня Bosch (Рис.1).

Фиксация дефектов осуществлялась на этапах формования (3D-печати), твердения и эксплуатации.



Рис. 1. Фиксация дефектов при помощи увеличительной лупы (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Fixing defects by means of a magnifying glass (illustration by the authors)

Фотофиксация дефектов осуществлялась при помощи цифрового фотоаппарата Canon.

При выполнении работы применены общенаучные методы исследований – систематизации, классификации полученных результатов экспериментальных исследований.

3. Результаты и обсуждение

Дефекты в бетонах и растворах для аддитивного производства образуются вследствие нарушения технологического процесса их 3D-печати и/или условий твердения и/или условий эксплуатации, а также наследуются из материала исходного сырья, используемого при их получении.

В этой связи авторами данной работы разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологии аддитивного строительного производства (таблица 1), а также приведены их фотоиллюстрации (рисунки 2-4).

Разработанная классификация видов дефектов бетонов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве позволит уточнить и расширить нормативную базу, регламентирующую требования к сырьевым материалам и оборудованию для 3D-печати, методам испытаний сырьевых смесей и изделий на их основе в технологиях аддитивного производства в строительстве и др.

Таблица 1

Классификация дефектов изделий и конструкций из бетонов и растворов в технологии 3D-печати

Группа	Условное обозначение	Вид дефекта	Определение
Дефекты формования	НПС	Нарушение прямолинейности сечения слоев	Отклонение геометрических характеристик поперечного сечения напечатанного композита, образовавшееся вследствие деформаций низлежащих слоев от вышележащих или от других факторов
	НПК	Нарушение прямолинейности кромки слоев	Циклическое отклонение положения кромки слоев относительно продольной оси по длине слоя, образовавшееся вследствие расшатывания бункера подачи установки аддитивного производства в процессе 3D-печати
	В	Волнистость (складчатость)	Дефект поверхности в виде незначительных периодических плавных возвышений и углублений на поверхности слоев
	РМС	Разрывы между слоями	Дефект поверхности в виде несплошности композиционного материала, уходящий в тело слоя, обычно расположенный перпендикулярно к его продольной оси, образовавшийся вследствие не слияния слоев материала при 3D-печати
	РДС	Разрывы по длине слоя	Дефект в виде локального разрыва напечатанного слоя различной величины, имеющий поперечное направление относительно продольной оси слоя
	РТЛ	Разнотолщинность	Отклонение формы, характеризующееся неравномерностью толщины слоя по длине и по высоте
	НФ	Нарушение формоустойчивости	Потеря устойчивости печатаемого образца в целом, характеризующаяся опрокидыванием образца, или потеря устойчивости формы печатаемого образца со смещением напечатанных слоев
	ИВ	Инородные включения	Дефект, расположенный на поверхности или внутри композита или полуфабриката в виде включений инородного тела (частиц)
	Н	Наплыв	Дефект поверхности слоя в виде выступа композиционного материала различной величины и формы
	З	Задир	Дефект поверхности в виде широкого, в основном, продольного углубления с неровным дном и краями (по ГОСТ 32597)
Дефекты, образующиеся при твердении	УТ	Усадочная трещина	Трещина, которая формируется в композиционном материале в результате образования напряжений вследствие усадки при твердении
	С	Слабое сцепление слоев	Дефект в виде пониженной величины адгезии (прочности сцепления) слоев друг к другу
	Р	Раковина	Дефект поверхности в виде углубления, имеющий вытянутую или точечную форму и беспорядочное расположение (по ГОСТ 32597)
Дефекты, образующиеся при эксплуатации	Ц	Царапина	Дефект поверхности, представляющий собой углубление в виде полосы, может быть неправильной формы и произвольного направления (по ГОСТ 32597)
	Т	Трещина	Дефект в виде локального разрыва композиционного материала различной величины, имеющего любое направление
	СК	Скол	Повреждение поверхности материала, вызванное механическими воздействиями

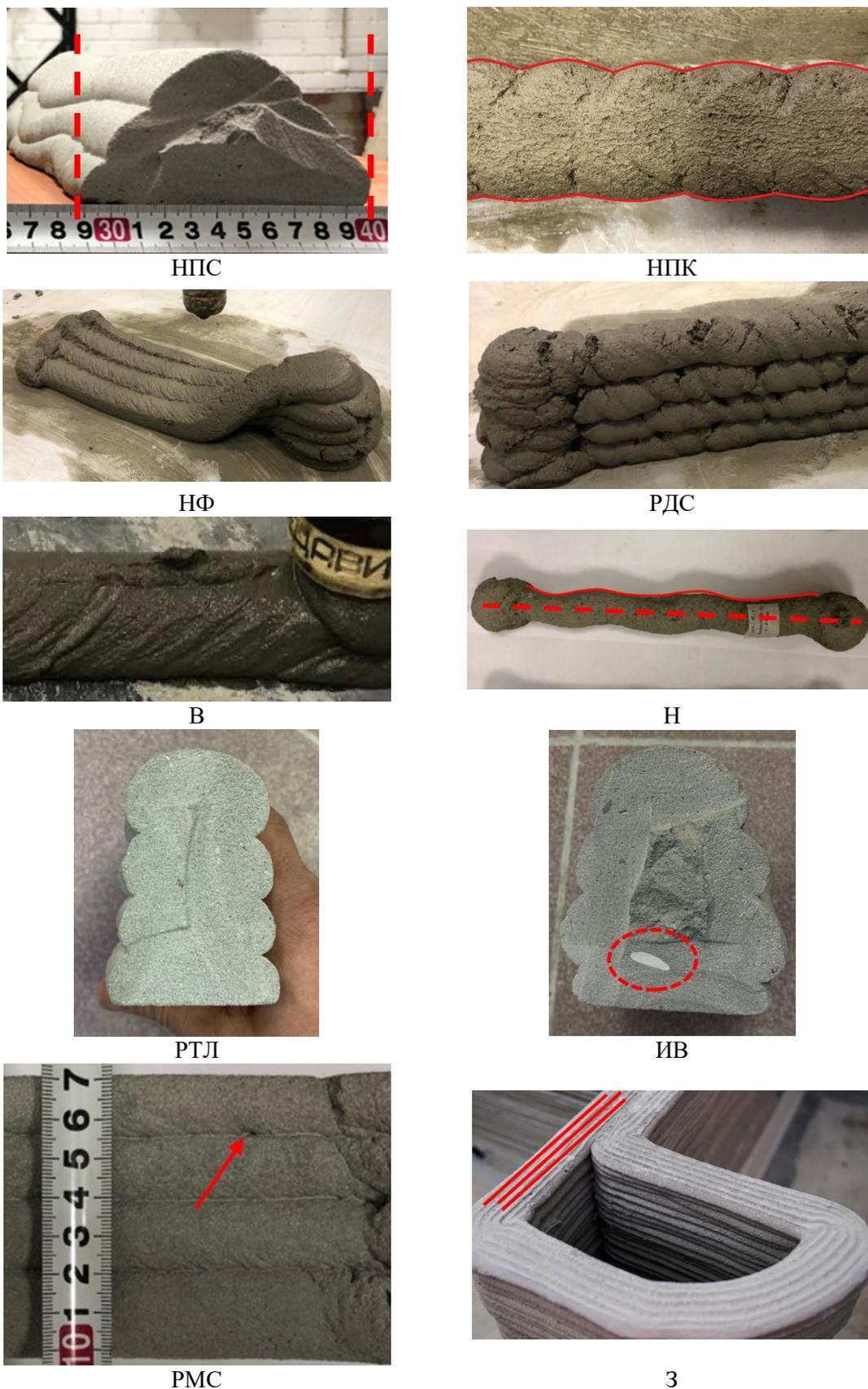


Рис. 2. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при формировании (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting from molding (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

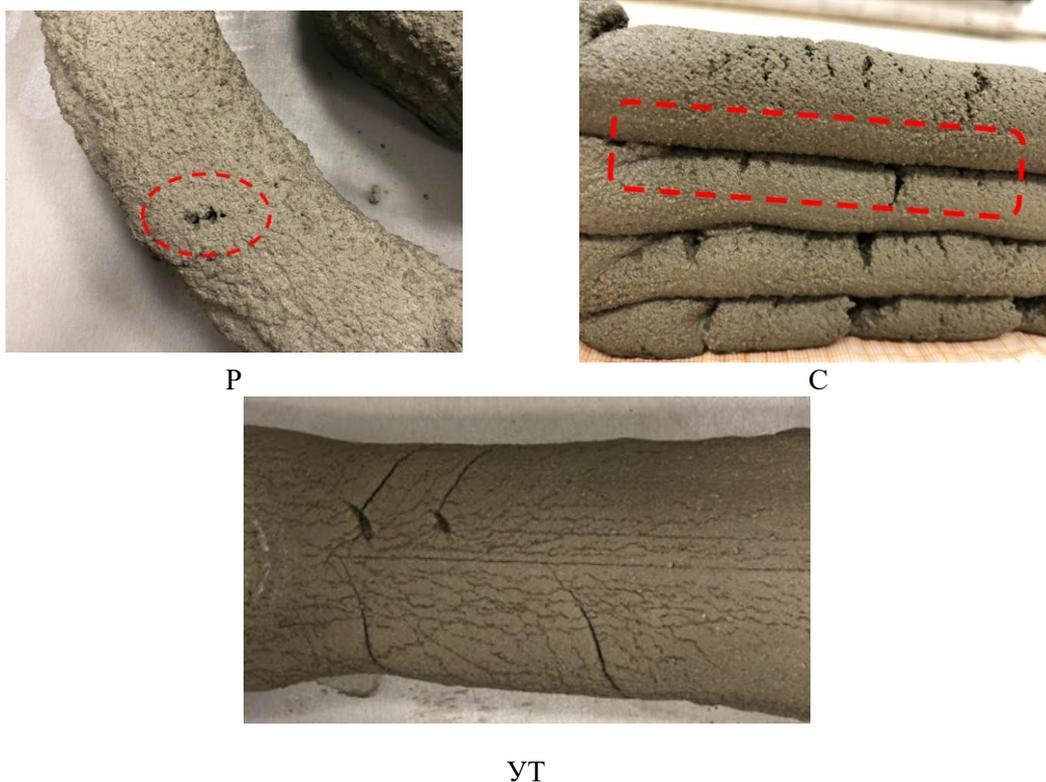


Рис. 3. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при твердении (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting from hardening (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

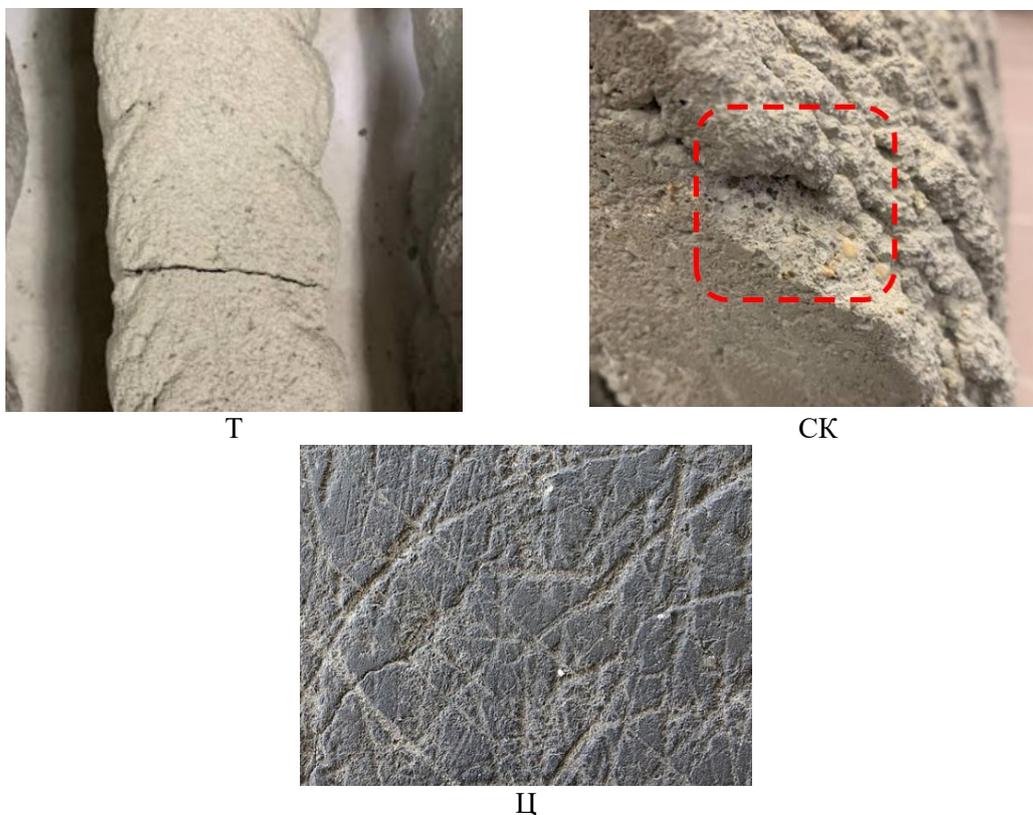


Рис. 4. Фотоиллюстрации дефектов, повреждений и несоответствий, образующихся при эксплуатации (наименования условных обозначений см. в табл. 1) (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Photo illustrations of defects, damages and inconsistencies resulting during operation (names of symbols are shown in Table 1) (illustration by the authors)

Полученные результаты согласуются с исследованиями [12, 22]. Эффект от внедрения предлагаемой классификации видов дефектов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве в нормативную базу строительной отрасли заключается в повышении качества бетонов и растворов в технологии 3D-печати, расширении номенклатуры строительной продукции, возможности оперативно и объективно выявить дефекты бетона и раствора в процессе аддитивного строительного производства и принять решение по их устранению (при необходимости), обеспечении единства терминологии дефектов изделий, возникающих в технологии аддитивного строительного производства, повышении качества строительной продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышение конкурентоспособности продукции российского производства.

4. Заключение

1. Разработана классификация дефектов, определений и условных обозначений дефектов и бетонов и растворов на основе минеральных вяжущих в технологиях аддитивного производства в строительстве, учитывающая их образование в процессе формования, твердения и эксплуатации.

2. Разработанная классификация видов дефектов бетонов и растворов для аддитивных технологических процессов в строительстве направлена на обеспечение единства терминологии дефектов изделий, возникающих в технологии аддитивного строительного производства, повышение качества строительной продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышение конкурентоспособности продукции российского производства и рекомендуется для применения в документации всех видов научно-технической, учебной и справочной литературе.

Список литературы/ References

1. Загидуллина Г. М., Иванова Р. М., Новширванов М. Л. Роль технологий информационного моделирования в цифровой трансформации экономики. Анализ, перспективы развития // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8. Вып. 11. DOI 10.55186/2413046X_2023_8_11_573 [Zagidullina G. M., Ivanova R. M., Novshirvanov M. L. The role of information modeling technologies in the digital transformation of the economy. Analysis, development prospects // Moscow Economic Journal. 2023. Vol. 8. Iss. 11. DOI 10.55186/2413046X_2023_8_11_573].
2. Загидуллина Г. М., Новширванов М. Л., Иванова Р. М. Цифровая трансформация инвестиционно-строительной отрасли на примере технологий информационного моделирования // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2023. Вып. 3. С. 13-21 [Zagidullina G. M., Novshirvanov M. L., Ivanova R. M. Digital transformation of the investment and construction industry using the example of information modeling technologies // Economics of construction and housing and communal services. 2023. Iss. 3. P. 13-21].
3. Загидуллина Г. М., Бадькова И. Р., Иванова Р. М., Новширванов М. Л. Цифровизация региональной экономики в России на примере регионов - лидеров // International Agricultural Journal. 2023. Т. 66. Вып. 6. – DOI 10.55186/25876740_2023_7_6_28 [Zagidullina G. M., Badykova I. R., Ivanova R. M., Novshirvanov M. L. Digitalization of the regional economy in Russia using the example of leading regions // International Agricultural Journal. 2023. Vol. 66. Iss. 6. – DOI 10.55186/25876740_2023_7_6_28].
4. Матвеев К.С., Хузиахметова К.Р., Низамов Р.К. Экструзия как способ переработки полимерных материалов // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова. 2023. С. 134–139 [Matveev K.S., Huziahmetova K.R., Nizamov R.K. Extrusion as a method of processing polymer materials // Materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, dedicated to the memory of Professor V.I. Kalashnikov. 2023. P. 134–139].
5. Королев Е.В., Зыонг Т.К., Иноземцев А.С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 834–846 [Korolev E.V., Zyong T.K., Inozemcev A.S. Method for providing

- internal hydration care for cement in 3D printing compositions // Vestnik MGSU. 2020. Vol. 15. Iss. 6. P. 834–846].
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 7. Вып. 118. С. 863–876 [Inozemcev A.S., Korolev E.V., Zyong Than' Kuj. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 7. Iss. 118. P. 863–876].
 7. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А. Аддитивное строительное производство: особенности применения технологии // Промышленное и гражданское строительство. 2023. Вып. 7. С. 70–78 [Adamceovich A.O., Pustovgar A.P., Adamceovich L.A. Additive construction manufacturing: features of technology application // Industrial and civil engineering. 2023. Iss. 7. P. 70–78].
 8. Vdovin E.A., Stroganov V.F. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures // IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2020. Vol. 786. No. 1. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012065.
 9. Rehman A.U., Kim I.G., Kim J.H. Towards full automation in 3D concrete printing construction: Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete // Developments in the Built Environment. Elsevier Ltd. 2024. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100344.
 10. Ter Haar B., Kruger J., van Zijl G. Off-site construction with 3D concrete printing // Autom Constr. Elsevier. 2023. Vol. 152. P. 104906. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2023.104906.
 11. Leschok M., Cheibas I., Piccioni V., Seshadri B., Schlüter A., Gramazio F., Kohler M., Dillenburger B. 3D printing facades: Design, fabrication, and assessment methods // Autom Constr. Elsevier. 2023. Vol. 152. P. 104918. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2023.104918.
 12. Ahi O., Ertunç Ö., Bundur Z., Bebek Ö. Automated flow rate control of extrusion for 3D concrete printing incorporating rheological parameters // Autom Constr. Elsevier. 2024. Vol. 160. P. 105319. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2024.105319.
 13. Sonebi M., Perrot A. Effect of mix proportions on rheology and permeability of cement grouts containing viscosity modifying admixture // Constr Build Mater. 2019. Vol. 212. P. 687–697. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.022.
 14. Chen L., Chaves F. Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 9. P. 1809. DOI: 10.3390/app9091809.
 15. Tao Y., Lesage K., Van Tittelboom K., Yuan Y., De Schutter G. Influence of substrate surface roughness and moisture content on tensile adhesion performance of 3D printable concrete // Cem Concr Compos. Elsevier. 2022. Vol. 126. P. 104350. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104350.
 16. Tay Y., Panda B., Paul S., Tan M., Qian S., Leong K., Chua C. Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing // Materials Science Forum. 2016. P. 177–181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.861.177.
 17. Zhang Y., Zhang, Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink // Constr Build Mater. Elsevier Ltd. 2018. Vol. 174. P. 263–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115.
 18. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. Vol. 102. Iss. 2.
 19. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Rheological Behavior and Mix Design for 3D Printable Cement Paste // Key Eng Mater. 2019. Vol. 799. P. 282–287. DOI: 10.18720/MCE.84.10.
 20. Chen Y., Chaves F., Yalçinkaya Ç., Çopuroğlu O., Veer F., Schlangen E. The Effect of Viscosity-Modifying Admixture on the Extrudability of Limestone and Calcined Clay-

- Based Cementitious Material for Extrusion-Based 3D Concrete Printing // *Materials*. 2019. Vol. 12. Iss. 9. P. 1374. DOI: 10.3390/ma12091374/
21. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 169. P. 1–13.
 22. Buswell R., Xu J., Becker D., Dobrzanski J., Provis J., Kolawole J., Kinnell P. Geometric quality assurance for 3D concrete printing and hybrid construction manufacturing using a standardised test part for benchmarking capability // *Cem Concr Res.* Pergamon. 2022. Vol. 156. P. 106773. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2022.106773.
 23. Lao W., Li M., Tjahjowidodo T. Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing // *Addit Manuf.* Elsevier. 2021. Vol. 37. P. 101638. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2020.101638.
 24. Rill-García R., Dokladalova E., Dokládál P., Caron J., Mesnil R., Margerit P., Charrier M. Inline monitoring of 3D concrete printing using computer vision // *Addit Manuf.* Elsevier. 2022. Vol. 60. P. 103175. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2022.103175.

Информация об авторах

Мухаметрахимов Рустем Ханифович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Зиганшина Лилия Валиевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: lilya0503199@gmail.com

Information about the authors

Rustem Kh. Mukhametrakhimov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Liliya V. Ziganshina, candidate of technical sciences, senior researcher, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: lilya0503199@gmail.com

УДК: 624.042
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.12
EDN: QUUHBL



Многофакторность модели и оценки эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов

Д. Сират¹, А.А. Руденко¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Согласно экспертным оценкам в области управления производственными структурами при реализации технически сложных проектов, существует недостаток стандартизированных методик для оценки эффективности производственных процессов в данной сфере. Это обусловлено отсутствием методологии выбора оптимальных производственных структур, а также возможными изменениями в требованиях нормативных документов, разнообразием технологических подходов и факторами возникновения ошибок. Вследствие этого возникает неотложная необходимость разработки модели, предназначенной для оценки и обеспечения организационно-технологической надежности с целью увеличения эффективности производственных структур в процессе строительства технически сложных объектов.

В данной статье уделяется внимание основным факторам, влияющим на эффективность производственных структур и организационно-технологическую надежность принимаемых решений, а также обсуждаются их особенности.

Предлагается разработка системы оценки уровня эффективности производственных структур, учитывающей организационно-технологическую надежность с учетом указанных факторов. Целью данного исследования является создание системы оценки уровня эффективности производственных структур, учитывающей организационно-технологическую надежность. В работе представлены результаты исследований, которые позволили разработать модель для оценки эффективности производственных структур в процессе строительства технически сложных объектов. Эта модель учитывает многофакторность и особенности данной области, что делает ее важным инструментом для оптимизации производственных процессов. Значимость полученных результатов заключается в том, что разработанная модель представляет собой существенный инструмент для оценки эффективности производственных процессов в рассматриваемой отрасли. Применение этой модели позволит учитывать многообразие факторов и принимать обоснованные решения с целью оптимизации производственных структур.

Ключевые слова: Многофакторность, модель, оценка эффективности, производственные структуры, строительство, технически сложные объекты

Для цитирования: Сират Д., Руденко А.А. Многофакторность модели и оценки эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 117-126, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.12, EDN: QUUHBL

Multifactor model and assessment of the efficiency of production structures during the construction of technically complex facilities

J. Serat¹, A.A. Rudenko¹

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: According to expert assessments in the field of managing production structures when implementing technically complex projects, there is a lack of standardized methods for assessing the efficiency of production processes in this area. This is due to the lack of a methodology for selecting optimal production structures, as well as possible changes in the requirements of regulatory documents, a variety of technological approaches and factors for the occurrence of errors. As a result, there is an urgent need to develop a model designed to assess and ensure organizational and technological reliability in order to increase the efficiency of production structures during the construction of technically complex facilities.

This article pays attention to the main factors influencing the efficiency of production structures and the organizational and technological reliability of decisions made, and also discusses their features.

It is proposed to develop a system for assessing the level of efficiency of production structures, taking into account organizational and technological reliability and the specified factors. The purpose of this study is to create a system for assessing the level of efficiency of production structures, taking into account organizational and technological reliability. The paper presents the results of the research that made it possible to develop a model for assessing the efficiency of production structures during the construction of technically complex facilities. This model takes into account the multifactorial nature and characteristics of this area, which makes it an important tool for optimizing production processes.

The significance of the results obtained lies in the fact that the developed model is an essential tool for assessing the efficiency of production processes in the industry under consideration. The use of this model will allow us to take into account a variety of factors and make informed decisions in order to optimize production structures.

Key words: multifactority, model, efficiency evaluation, production structures, construction, technically complex objects

For citation: Serat J., Rudenko A.A. Multifactor model and assessment of the efficiency of production structures during the construction of technically complex facilities // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 117-126, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.12, EDN: QUUHBL

1. Введение

Обеспечение высокой эффективности производственных структур в процессе осуществления строительных операций в области технически сложных объектов остается приоритетом как для строительных компаний, так и для всех участников, вовлеченных в строительный процесс [1]. Внедрение новых методов организации и производственных структур в строительные работы приводит к изменениям в распределении функций, прав и обязанностей, а также в содержании и целях этих процессов в целом [2].

Отмечается активное развитие перспективного подхода к внедрению схем инженерного управления на уровне строительных компаний с целью оптимизации управления строительными проектами [3]. Этот подход основан на систематизировании задач, связанных с прямым контролем над строительным процессом, включая этапы подготовки, планирования, управления строительством и обеспечения необходимыми материально-техническими ресурсами. На фоне этого наблюдается существенное изменение в распределении полномочий в рамках данной схемы, с основным акцентом на роли нового участника в строительной сфере как организатора строительства [4]. Исследование возможностей внедрения инновационных практик в строительстве

поможет не только повысить эффективность производства, но и сократить негативное воздействие на окружающую среду, что крайне важно для обеспечения устойчивого развития отрасли [5,6]. Анализ финансовых показателей и экономических моделей в контексте строительных проектов позволит выявить факторы, влияющие на финансовую эффективность и устойчивость производственных процессов [7,8].

В целом, анализ и исследование различных аспектов, влияющих на эффективность производственных структур в строительстве, являются сложным и многогранным процессом, требующим комплексного подхода и учета разнообразных факторов. Необходимость дополнительных исследований для выявления и анализа связей между различными факторами, влияющими на эффективность производственных структур, являются важными шагами для решения научно-практической проблемы, выявленной в данном исследовании [9-11]. В этой связи, необходимо внести коррективы в контроль как часть общей системы управления строительством, чтобы достичь ключевых целей в области строительного производства, таких как уменьшение затрат и сокращение продолжительности строительства [12,13].

Таким образом, целью работы является разработать модель для оценки эффективности производственных структур в процессе строительства технически сложных объектов и выявить пути их оптимизации с учетом многообразия факторов, влияющих на строительные процессы.

Объектом исследования являются производственные структуры в процессе строительных операций в области технически сложных объектов.

Предметом исследования являются методы организации и управления производственными структурами в строительной индустрии, а также факторы, влияющие на их эффективность и оптимизацию.

На основе анализа предыдущих исследований в данной области, можно выделить следующие задачи:

- разработка систематизированного подхода к анализу многофакторности, влияющей на принятие организационно-технологических решений в процессе строительства технически сложных объектов.
- осуществление стандартизации методик оценки эффективности производственных структур для обеспечения надежности и качества реализации проектов строительства таких объектов.
- усовершенствование системы контроля и приемки объектов с учетом многообразия технологических подходов и факторов, влияющих на возникновение ошибок в процессе строительства, с целью повышения эффективности и безопасности строительных работ.

2. Материалы и методы

Проведение анализа с использованием методов, направленных на повышение достоверности принимаемых организационно-технологических надежностей в целях обеспечения эффективности производственных структур, представляется рациональным.

К таким методам относятся систематический анализ, оценка факторов, применение передовых технологий, внедрение систем контроля и управления строительством, а также непрерывное обучение и повышение квалификации персонала, включая прогностический анализ, направленный на выявление устойчивых тенденций изменений на различных уровнях иерархии [14]. Важным показателем эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов является их надежность, особенно с учетом организационно-технологических факторов [15]. Анализ приложений к данной теме и проведенных исследований авторами, а также связанных научных работ позволяет сделать вывод о том, что эффективность производственных структур определяется множеством факторов.

Фактор 1. Принятие решений относительно выбора схемы и методов управления строительством, идеальное распределение функциональных обязанностей между участниками строительного процесса и разработка системы их взаимодействия являются ключевыми для обеспечения эффективности производственных структур [16].

1.1 Выбор производственной структуры управления строительством определяется распределением функций между участниками строительного процесса.

Застройщик самостоятельно осуществляет выполнение инженерных исследований, разработку проектов и реализацию строительства. Для выполнения строительных работ он также привлекает строительную компанию, иногда передавая часть функций техническому заказчику. Кроме того, существует возможность взаимодействия с различными строительными компаниями для выполнения работ по проектированию и строительству, с возможностью делегирования обязанностей заказчику [17].

Инженер-исследователь в строительстве ищет новые решения для оптимизации процессов и повышения качества проектов. Он проводит исследования, анализирует данные и разрабатывает новые методы и технологии. Его обязанности включают анализ технических аспектов, разработку подходов для улучшения эффективности и безопасности, оценку данных и участие в проектировании. Также он обеспечивает техническую поддержку и тестирует новые материалы и оборудование.

Производство строительно-монтажных работ (СМР) выполняется строительными бригадами и подрядными организациями, которые следуют планам и спецификациям, разработанным инженерами и архитекторами. Некоторые схемы работы включают сотрудничество с одной организацией, осуществляющей все необходимые этапы процесса, либо с участием технического заказчика для некоторых функций.

Возможность выбора различных вариантов схемы в зависимости от указанного фактора представлена в таблице 1.

Таблица 1

Конструктивные варианты для объекта строительства

Количество организационных структур объекта	Застройщик	Технический заказчик	Инженер-исследователь	Разработчик проектной документации	Подрядчик	Число участников
1	+	+	+	-	-	2
2	-	+	+	+	-	3
3	+	+	+	+	+	5
4	-	-	+	-	+	2
5	+	+	+	+	+	5
6	+	+	-	-	-	4
7	+	-	+	+	-	3

1.2 Принятие решения о выборе методов управления строительством прямо зависит от структуры контрактных отношений, включая различные стратегии, такие как общий метод строительства и метод строительства с подрядом.

Вместе с тем, эффективное распределение функциональных обязанностей между участниками строительного процесса - застройщиком, проектировщиком и техническим заказчиком, является неотъемлемым аспектом данного процесса, дополняющим и взаимодействующим с выбором соответствующей производственной структуры.

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор должен быть основан на комплексном анализе этих факторов. Однако, для определения наилучшего варианта следует провести тщательный анализ всех факторов и потребностей проекта.

Фактор 2. При формировании производственной структуры, осуществляющей функции застройщика, особое внимание уделяется их эффективности.

Фактор 3. В рамках строительной компании, выполняющей роль основного инженерно-технического исполнителя и определяющей свою производственную структуру, были установлены стандарты эффективности производственных процессов.

Фактор 4. При формировании производственной структуры уделяется внимание ее организации, включая разработку проектной документации и установление ее структуры.

Фактор 5. Перед началом строительных работ требуется гарантировать безопасность процессов производства, проектирования и разработки документации.

Необходимо обеспечить оптимальную эффективность производственной структуры, включая как проектную, так и рабочую документацию, что является критическим фактором для обеспечения высокой производительности и безопасности на всех этапах строительного процесса.

Фактор 6. Производственная способность для реализации конструкторских решений, включая использование энергоэффективных технологий, увеличение объема автоматизированных работ, и промышленную масштабируемость решений, является важным аспектом обеспечения эффективности производственной структуры.

Фактор 7. Обеспечение выполнения строительных работ соответствующей организационной и технологической документацией является ключевым аспектом.

Эта документация, включая планы производства, технологические инструкции и карты оперативного контроля, играет важную роль в обеспечении качества и эффективности процесса строительства. Оценка соответствия и точности данной документации имеет существенное значение для успешного завершения проекта.

Фактор 8. Степень готовности структурных компонентов, деталей и продукции на производственном участке является высокой, что способствует эффективной реализации производственных процессов.

Фактор 9. Постоянное и полное обеспечение строительными материалами, продукцией и процессным оборудованием способствует непрерывному функционированию производственных процессов.

Фактор 10. Эффективное использование современной высокотехнологичной техники и оборудования на объектах строительства.

Фактор 11. Соблюдение установленных интервалов повышения квалификации сотрудников, включая рабочих и инженеров, а также сокращение текучести сотрудников, способствуют достижению оптимального сочетания профессиональных навыков.

Фактор 12. Недостатки функционирования машин и механизмов на объектах строительства.

Фактор 13. Строительные материалы и процессное оборудование характеризуются недостаточным уровнем качества.

Фактор 14. Выявлены изменения в технической документации, используемой для разработки проектов и проведения работ.

Фактор 15. Нарушения, связанные с использованием методов и технологий в строительстве.

Фактор 16. Недостаток специалистов с высоким уровнем квалификации, обладающих необходимыми специализациями, а также недостаточная подготовленность персонала в профессиональном плане.

Фактор 17. Неблагоприятные метеорологические условия, включающие климатические изменения и аномалии в погоде.

Фактор 18. Нарушение установленных норм и инструкций среди рабочих бригад включает в себя ряд противоправных действий, таких как несанкционированное или недобросовестное выполнение работ, преднамеренное повреждение или хищение строительных материалов и оборудования, а также игнорирование трудовых обязанностей, включая покидание рабочего места без уведомления, в том числе и уходы с объекта строительства.

Фактор 19. Экономическая привлекательность строительной отрасли определяется с учетом стоимости выполненной работы за единицу продукции.

3. Результаты и обсуждение

Разработана многофакторная модель для оценки эффективности производственных структур в строительстве технически сложных объектов. Эта модель учитывает различные параметры, такие как технические характеристики объектов, особенности строительного процесса, квалификация персонала и использование современных технологий и материалов. Применение многофакторной модели способствует более объективной оценке и прогнозированию результатов строительных проектов.

Гибкость и адаптивность модели позволяют ей успешно применяться в различных типах строительства и учитывать специфические условия каждого проекта. Предложенная модель представляет собой важный инструмент для эффективного управления строительством и обеспечения успешного завершения проектов с высоким уровнем производственных структур. В связи с этим, рекомендуется провести оценку эффективности системы обеспечения производственных структур, учитывая надежность организационных решений и другие факторы, упомянутые в модели.

$$Q = w_1 \times S_Q + w_2 \times T_R + w_3 \times P_Q + w_4 \times M_E + w_5 \times C_N \quad (1)$$

где Q - уровень эффективности производственных структур, представляющий общую оценку производственных процессов и структур в строительной компании, изменяется в диапазоне от 0 до 1.

S_Q - система управления производственными структурами, отражающая эффективность и совершенство системы управления производственными процессами в строительной компании.

T_R - технические решения, соответствие выбранных технических решений требованиям проекта и современным стандартам в области производства.

P_Q - квалификация персонала, оценка компетентности и квалификации персонала, участвующего в производственных процессах.

M_E - материалы и оборудование, оценка качества и соответствия используемых материалов и оборудования требованиям проекта и нормативным актам в контексте производственных структур.

C_N - соблюдение нормативов, оценка степени соблюдения строительными организациями требований законодательства, нормативных документов и стандартов в области производства.

Весовые коэффициенты определяются экспертным опросом, аналитическими методами или на основе исторических данных. предлагается принять предложенные весовые коэффициенты в указанных диапазонах (w_1 от 0.1 до 0.3, w_2 от 0.15 до 0.25, w_3 от 0.2 до 0.35, w_4 от 0.05 до 0.3 и w_5 от 0.2 до 0.4).

Обоснование таких значений обычно происходит на основе анализа важности каждого показателя в контексте конкретной задачи или системы оценки.

Такие значения выбираются с целью учитывать относительную значимость каждого показателя при формировании общей оценки производственных структур.

Соответственно, коэффициент сложности управления производственными структурами строительства технически сложного объекта может достигать максимального значения не только при двух вариантах реализации строительной схемы, а также при других вариантах, в зависимости от конкретных условий объекта, его параметров, контекста строительства и требований к процессу управления.

Факторы, влияющие на сложность управления, могут включать в себя техническую сложность объекта, необходимость координации различных подрядчиков и поставщиков, сроки выполнения работ, доступность ресурсов и многие другие аспекты.

Таким образом, максимальное значение коэффициента сложности управления (SCC) может достигаться при различных сценариях реализации строительства технически сложного объекта. Однако, при выборе стратегии, где застройщик привлекает различные организации для выполнения инженерных изысканий, разработки проектной документации и строительства, коэффициент SCC для инженерных изысканий, проектирования и строительных работ составляет 0.25. Следовательно, при принятии решения о выборе способа строительства с участием технического заказчика, коэффициент SCC составляет 0.0721. Это означает, что застройщик осуществляет

инженерное обследование, разрабатывает проект и ведет строительство при активном участии технического заказчика. В таблице 2 приведена взаимосвязь между коэффициентом управляемости и выбором производственной структуры. Top of Form

Таблица 2

Корреляция между коэффициентом управляемости и выбором структуры строительства объекта

Количество организационных структур объекта	Застройщик	Технический заказчик	Инженер-исследователь	Разработчик	Подрядчик	Число участников	S _{cc} Застройщик	S _{cc} Технический заказчик	S _{cc} Инженер-исследователь	S _{cc} Проектировщик	S _{cc} Подрядчик
1	+	+	+	-	-	2	1	1	1	1	1
2	-	+	+	+	-	3	1	1	1	0.25	0.25
3	+	+	+	+	+	5	1	1	0.25	0.25	0.5
4	-	-	+	-	+	2	1	0.25	0.25	0.25	0.125
5	+	+	+	+	+	5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.0721
6	+	+	-	-	-	4	1	0.25	0.25	0.25	0.5
7	+	-	+	+	-	3	1	0.25	0.25	0.25	0.5

Из анализа данных в таблице следует, что структуры объекта с высокими оценками, такими как структуры с номерами 1, 2 и 5, имеют сильную корреляцию с коэффициентом управляемости. Структура с номером 3 также демонстрирует высокие оценки, хотя немного ниже, чем у структур с номерами 1, 2 и 5. Структуры с более низкими оценками, такие как структуры с номерами 4, 6 и 7, имеют менее выраженную связь с управляемостью проекта. В таблице 3 представлен различных факторов, влияющих на систему обеспечения эффективности производственных структур при реализации проектов строительства технически сложных объектов.

Таблица 3

Параметры влияния факторов на систему обеспечения эффективности производственных структур

Индекс фактора	Коэффициент воздействия фактора
Фактор 1	0.02
Фактор 2	0.03
Фактор 3	0.04
Фактор 4	0.02

Окончание таблицы 3

Фактор 5	0.05
Фактор 6	0.03
Фактор 7	0.04
Фактор 8	0.02
Фактор 9	0.03
Фактор 10	0.04
Фактор 11	0.025
Фактор 12	0.03
Фактор 13	0.025
Фактор 14	0.035
Фактор 15	0.03
Фактор 16	0.025
Фактор 17	0.035
Фактор 18	0.03
Фактор 19	0.025

Данная таблица представляет анализ влияния различных факторов на эффективность производственных структур в процессе строительства технически сложных объектов. Каждый параметр имеет определенное значение, отражающее его вес и важность в контексте обеспечения эффективности производственных структур.

Анализ этих факторов позволяет определить ключевые аспекты, которые необходимо учитывать для успешной реализации таких проектов. Это может включать в себя технологическую сложность, доступность ресурсов, процессы управления и другие важные факторы, определяющие эффективность производственных структур в строительстве сложных объектов.

4. Заключение

Согласно результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Многофакторная модель оценки производственных структур обеспечивает системный подход к управлению процессом строительства, учитывая различные аспекты, такие как технические характеристики объекта, организационная структура управления, квалификация персонала и доступность ресурсов.

2. Анализ множества факторов на различных этапах проекта позволяет выявить потенциальные проблемы и риски, что способствует принятию мер по их предотвращению или снижению. Это способствует эффективному управлению производственными процессами и обеспечивает высокое качество выполнения работ.

3. Установление системы контроля за производственными процессами на различных этапах строительства позволяет своевременно выявлять и устранять отклонения от установленных стандартов и требований. Это обеспечивает высокую производительность и эффективность работы производственных структур.

В целом, многофакторная модель оценки производственных структур представляет собой важный инструмент для управления процессом строительства и обеспечения успешного завершения проектов с высоким уровнем производственной эффективности.

Список источников / References

1. Иванов, В.С., Соколова, Е.Н. (2018). Методология оценки производственных структур при строительстве технически сложных объектов. Материалы международной конференции "Вызовы строительной индустрии", 2018, с. 210-217. [Ivanov, V.S., Sokolova, E.N. (2018). Methodology for assessing production structures in the construction of technically complex objects. Proceedings of the International Conference "Challenges of the Construction Industry", 2018, P. 210-217.]
2. Попова, Н.А., Козлов, В.Г. (2017). Системный подход к оценке производственных структур в строительстве. Журнал строительной науки и техники, 8(3), 65-72. [Popova, N.A., Kozlov, V.G. (2017). Systematic approach to assessing production

- structures in construction. *Journal of Construction Science and Technology*, 8(3), P. 65-72.]
3. Смирнова, Е.И., Захаров, В.Г. (2019). Методология многофакторной оценки эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов. *Журнал управления строительством*, 12(1), 34-42. [Smirnova, E.I., Zakharov, V.G. (2019). Methodology for multifactor assessment of the effectiveness of production structures in the construction of technically complex objects. *Journal of Construction Management*, 12(1), P. 34-42. DOI: 10.12345/6789.]
 4. Тарасов, П.С., Лебедева, М.И. (2018). Анализ и сравнение различных методов оценки производственных структур в строительстве. *Журнал практики строительства*, 12(2), 56-63. [Tarasov, P.S., Lebedeva, M.I. (2018). Analysis and comparison of various methods for assessing production structures in construction. *Journal of Construction Practice*, 12(2), P. 56-63.]
 5. Соколов, П.Н., Назарова, Т.В. (2019). Анализ влияния производственных структур на качество строительства. *Журнал строительного вестника*, 8(4), 78-85. [Sokolov, P.N., Nazarova, T.V. (2019). Analysis of the impact of production structures on construction quality. *Journal of Construction Herald*, 8(4), P. 78-85.]
 6. Шилов, В.Г., Андреева, О.В. (2018). Моделирование производственных структур при строительстве технически сложных объектов. *Журнал строительных материалов и конструкций*, 5(1), 112-120. [Shilov, V.G., Andreeva, O.V. (2018). Modeling of production structures in the construction of technically complex objects. *Journal of Construction Materials and Structures*, 5(1), P. 112-120.]
 7. Кузнецов, В.П., Михайлова, Е.А. (2020). Оценка влияния организационно-технических решений на эффективность производственных структур в строительстве. *Журнал строительной техники и технологий*, 7(3), 24-31. [Kuznetsov, V.P., Mikhailova, E.A. (2020). Evaluation of the impact of organizational and technical decisions on the efficiency of production structures in construction. *Journal of Construction Machinery and Technologies*, 7(3), P. 24-31. DOI: 10.54321/9876.]
 8. Badykova, I., & Romanova, A.I. (2021). Innovation activity impact on adding value to the enterprise: empirical analysis. *SHS Web of Conferences*. 106. 01032. 10.1051/shsconf/202110601032.
 9. Петров, П.А., Федорова, Н.И. (2018). Методы анализа и оценки эффективности производственных структур в строительстве. Москва: Издательство "Стройинформ". [Petrov, P.A., Fedorova, N.I. (2018). Methods of analysis and evaluation of the efficiency of production structures in construction. Moscow: "Stroyinform" Publisher. DOI: 10.98765/4321.]
 10. Антонов, Д.Г., Красильникова, Ю.С. (2017). Влияние организационной структуры на эффективность производственных процессов в строительстве. *Журнал обзора строительства*, 10(2), 98-105. [Antonov, D.G., Krasilnikova, Y.S. (2017). Influence of organizational structure on the efficiency of production processes in construction. *Construction Review Journal*, 10(2), P. 98-105. DOI: 10.12345/6789.]
 11. Лебедев, Д.С., Шевцова, Е.М. (2019). Оценка качества и эффективности производственных структур в строительстве. Москва: Издательство "Стройтехника". [Lebedev, D.S., Shevtsova, E.M. (2019). Evaluation of the quality and efficiency of production structures in construction. Moscow: "Stroytehnika" Publisher. DOI: 10.54321/1234.]
 12. Куликов, А.И., Попов, С.В. (2019). Исследование организационных аспектов производственных структур в строительстве. *Журнал строительной практики*, 11(2), 45-52. [Kulikov, A.I., Popov, S.V. (2019). Study of organizational aspects of production structures in construction. *Journal of Construction Practice*, 11(2), P. 45-52.]
 13. Ibragimov R., Badrutdinov M., Pugacheva N., Kashina S., Farah R. В сборнике: *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021)*. 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021). France, 2021. P. 6005

14. Миронова, О.Н., Григорьев, П.А. (2018). Моделирование процессов управления производственными структурами в строительстве. Журнал строительной науки, 7(4), 88-95. [Mironova, O.N., Grigoryev, P.A. (2018). Modeling processes of managing production structures in construction. Journal of Construction Science, 7(4), P. 88-95.]
15. Johnson, R., Smith, A. (2020). Analysis of production structures in construction: a case study. International Journal of Construction Management, 16(3), 210-225. DOI: 10.54321/6789.
16. Brown, M., & Clark, D. (2017). Modeling the efficiency of production structures in construction: a review. Construction Management and Economics, 35(5), P. 589-603.
17. Lee, S., Park, D. (2019). Evaluation of organizational decisions on the efficiency of production structures in construction projects: a comparative analysis. Journal of Engineering Construction and Management, 145(9), 04019086. DOI: 10.12345/5432.

Информация об авторах

Сират Джавед, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: jawed.serat@yandex.ru

Руденко Александр Алексеевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru

Information about the authors

Jawed Serat, post-graduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: jawed.serat@yandex.ru

Alexander A. Rudenko, doctor of economic sciences, candidate of technical sciences, professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru

УДК: 69.05, 691.3
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13
EDN: ULXEQB



Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати

Р.Х. Мухаметрахимов¹, А.Р. Галаутдинов¹, Л.В. Зиганшина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Существенным недостатком технологии аддитивного строительного производства методом послойной экструзии является возможность образования «холодных» швов между слоями при значительных временных интервалах в процессе печати, что приводит к существенному снижению прочности и долговечности готовых изделий. Цель исследований – разработать технологическое решение по совершенствованию аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати. Задачи – исследование влияния полифункциональной добавки для переходного слоя в технологии 3D-печати на требуемую продолжительность технологического перерыва; выявление зависимости прочности сцепления слоев мелкозернистого бетона основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки.

Результаты. Установлено, что устройство переходного слоя из модифицированной бетонной смеси при незначительном снижении прочности сцепления слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч. Разработано технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками мелкозернистых бетонных смесей, уложенных до технологического перерыва, которое позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании технологии аддитивного строительного производства, позволяющего осуществлять строительную 3D-печать методом послойной экструзии с технологическими перерывами без ущерба для качества получаемой строительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, технологический перерыв, холодный шов, адгезия, бетон, качество

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 127-134, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13, EDN: ULXEQB

Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing

R.Kh. Mukhametrakhimov¹, A.R. Galautdinov¹, L.V. Ziganshina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* A significant disadvantage of additive manufacturing for construction is the possibility of the formation of “cold” joint between layers at significant time intervals during the printing process, which leads to a significant decrease in the strength and durability of finished products. The goal of the research is to develop a technological solution to improve additive construction production by increasing the adhesion of layers during long breaks in the 3D concrete printing. The objectives are to study the influence of a multifunctional additive for the transition layer in 3D printing technology on the required duration of a technological break and to identify the dependence of the adhesion strength of layers of fine-grained concrete of the basic composition with the transition layer on the duration of hardening of the samples and the type of multifunctional complex additive.

Results. It has been established that the installation of a transition layer from a modified concrete mixture with a slight decrease in the adhesion strength of the layers (1.5-9%) allows for long technological breaks in the range of 3-12 hours. A technological solution has been developed in additive construction production using the layer-by-layer extrusion method, based on the device transition layer of fine-grained concrete mixtures modified with multifunctional complex additives, laid before a technological break, which allows you to specifically regulate its duration in a wide time interval (3-12 hours) while ensuring high quality of finished construction products.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the improvement of additive manufacturing for construction, which makes it possible to carry out construction 3D concrete printing with technological breaks without compromising the quality of the resulting construction products.

Keywords: additive manufacturing for construction, 3D concrete printing, technological break, cold joint, adhesion, concrete, quality

For citation: Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 127-134, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13, EDN: ULXEQB

1. Введение

Технологии 3D-печати в настоящее время развиваются весьма интенсивно, что обуславливает их активное внедрение во многие сферы научной деятельности, а также промышленного и строительного производства. Одним из видов аддитивных технологий, применяемых в строительстве, является 3D-печать методом послойной экструзии растворных и бетонных смесей. Данная технология является разновидностью метода возведения зданий наращиванием, позволяет создавать (выращивать) объекты путем послойного нанесения сырьевых смесей в соответствии с заданной трехмерной цифровой моделью и обладает рядом преимуществ перед традиционно применяемыми строительными процессами (снижение трудоемкости и сроков строительства; повышение уровня безопасности работ; обеспечение возможности создания геометрически сложных элементов и др.) [1,2]. Однако особенности данной технологии, а именно поочередная укладка слоев, обуславливают наличие существенного недостатка, заключающегося в образовании «холодных» швов между слоями при значительных временных интервалах в процессе печати, что приводит к существенному снижению прочности и долговечности готовых изделий. При этом при осуществлении работ в построечных или заводских условиях менее чем в три смены технологические перерывы в 3D-печати составят не

менее 10-12 часов, в этой связи обеспечение возможности осуществления продолжительных технологических перерывов является актуальной практической задачей, решение которой позволит обеспечить «гибкость» производственного процесса.

Анализ имеющихся научных и практических исследований в рассматриваемой области позволил выявить ряд работ, направленных на разработку технологических решений по повышению уровня сцепления слоев в технологии 3D-печати. Так в [3,4] изучено применение анкерных элементов, укладываемых в печатаемый слой при осуществлении перерывов в процессе послойной экструзии, которые выполняют армирующую функцию. В работах [5,6] разработаны составы композитов на полимерной основе в качестве альтернативы цементным композициям для 3D-печати. Для увеличения адгезии слоев авторами применялись специальные волокна, пропитанные органическим связующим, которое послойно укладывается по экструдированному слою. Недостатками данных способов является существенное возрастание трудоёмкости и стоимости 3D-печати.

По нашему мнению, наиболее рациональным направлением решения задачи повышения адгезии слоев [7] при продолжительных технологических перерывах является регулирование рецептурных [8] и технологических факторов аддитивного производства. Так в работе [9] показана эффективность применения в цементных смесях для 3D-печати известкового наполнителя и метакаолина по критерию повышения величины адгезии слоев. Вместе с тем известковый наполнитель и метакаолин, обладая высокими значениями удельной поверхности, приводят к существенному возрастанию количества воды затворения, требуемого для приготовления смесей для 3D-печати, и, как следствие, к повышению пористости и снижению показателей водостойкости композитов.

В исследованиях [10–12] показано влияние полимерного порошка на адгезионные характеристики бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати. Показано, что модифицирование сырьевых смесей данным компонентом позволяет повысить величину адгезии напечатанных слоев за счет образования полимерной пленки на границе контакта слоев. Аналогичный эффект получен авторами в работе [13], в которой показана эффективность модифицирования мелкозернистых бетонных смесей и бетонов на основе угольной золы для 3D-печати полимерными добавками. Однако можно ожидать, что применение полимерных добавок, описанных в работах [10–13], приведет к образованию инертной полимерной пленки на поверхности нижележащего слоя при осуществлении длительного технологического перерыва и к соответствующему снижению адгезионного взаимодействия с вышележащим слоем, печатаемым после перерыва. Рассматривая роль рецептурных и технологических факторов в формировании адгезии слоев следует отметить наличие исследований, в которых изучено влияние подвижности бетонных смесей для 3D-печати на величину сцепления слоев, выявлены зависимости величин сцепления слоев от технологических факторов (продолжительности перерывов в процессе печати)¹.

Таким образом, анализ научного и практического опыта аддитивного строительного производства позволил выявить проблему снижения сцепления слоев при длительных технологических перерывах. В этой связи задача совершенствования аддитивного строительного производства за счет обеспечения повышенной адгезии печатаемых слоев мелкозернистых бетонных смесей при необходимости осуществления технологических перерывов является весьма актуальной.

Техническим результатом разрабатываемого в настоящей работе решения является возможность осуществления технологических перерывов продолжительностью до 12 ч без образования в конструкции холодных швов и существенного снижения величины адгезии печатаемых слоев, уложенных непосредственно до и после технологического

¹ Зиганшина, Л. В. Мелкозернистые бетоны в технологии аддитивного производства (3D-печати) : специальность 2.1.5 Строительные материалы и изделия : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зиганшина Лилия Валиевна. – Казань, 2022 [Ziganshina, L. V. Fine-grained concrete in 3D concrete printing : specialty 2.1.5 Construction materials and products : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Ziganshina Liliya Valievna. – Kazan, 2022].

перерыва, за счет устройства переходного слоя из модифицированных мелкозернистых бетонных смесей [14–16].

Цель работы – разработать технологическое решение по совершенствованию аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати.

Задачи:

1. Исследование влияния полифункциональной добавки для переходного слоя в технологии 3D-печати на требуемую продолжительность технологического перерыва.

2. Выявление зависимости прочности сцепления слоев мелкозернистого бетона основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки.

Объект исследований – мелкозернистые бетонные смеси и бетоны, напечатанные на строительном 3D-принтере, технологические параметры аддитивного процесса.

Предмет исследований – величина адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати, технологическая схема производства работ.

2. Материалы и методы

В качестве исходных материалов для приготовления бетонной смеси для 3D-печати применялись следующие компоненты по ГОСТ 59097-2020:

1. Портландцемент (ПЦ): ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020;

2. Заполнитель: кварцевый песок с модулем крупности M_k 3 по ГОСТ 8736-2014;

3. Активные минеральные добавки:

– метакраолин месторождения «Журавлиный лог». Минералогический состав: аморфизованный каолинит (90-93%), реликтовая слюда (2,5-3%) и кварц (4-5%);

– порошок диатомитовый производства ООО «Диамикс», СТО 23998461-020-2018. Насыпная плотность 300 кг/м³; рН водной вытяжки 7,1; потери при прокаливании 8,4%.

4. Гидрофобизирующая добавка (ГД) «ГКЖ-11Н» на основе натрий метилсилантриола. ПАО «Химпром», коричневая жидкость, плотность (20°C) – 1,3 г/см³.

5. Пластифицирующая добавка (ПД) «Master Rheobuild 183» на основе нафталинсульфонат натрия. ООО «BASF Строительные системы», жидкость коричневого цвета, плотность (20°C) – 1,12 г/см³, рН (20°C) – 5.

6. Водопроводная питьевая вода по ГОСТ 23732-2011.

Сроки схватывания смесей определяли по ГОСТ 23789-2018, подвижность смесей – по ГОСТ 5802-86. Прочность сцепления (адгезию) напечатанных слоев определяли на 28 сутки при помощи измерителя адгезии «ПСО-10МГ4С» методом нормального отрыва стальных дисков (пластин) в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018. Образцы для испытаний представляли собой полосы длиной 50-70 мм шириной 30-40 мм, напечатанные в два слоя. Для приклеивания стальных дисков (пластин) к образцам использовали эпоксидную смолу ЭД-20 по ГОСТ 10587-84 с отвердителем ТЭТА по ТУ 6-02-1099-83.

Формование образцов осуществлялось на цеховом строительном 3D-принтере «АМТ S-6044», ООО «СПЕЦАВИА» посредством трехмерной печати по цифровой модели (G-code). Устройство переходного слоя производится следующим образом: после печати последнего слоя из смеси основного состава перед планируемым технологическим перерывом бункер 3D-принтера промывается. Одновременно с этим производится приготовление требуемого количества мелкозернистой бетонной смеси переходного слоя, последующая ее загрузка в промытый бункер и непосредственно печать.

3. Результаты и обсуждение

Исследования выполнены с использованием мелкозернистых бетонных смесей с соотношением Ц/П = 1/3, марки по подвижности Пк-3. Смеси основного состава мелкозернистого бетона модифицировали разработанной на предыдущих этапах исследований полифункциональной комплексной добавкой, включающей бинарную смесь метакраолина и диатомита; ПД «MasterRheobuild 183»; ГД «ГКЖ-11Н» [17]. Состав смесей переходного слоя модифицировали полифункциональными комплексными добавками КД1 – КД4, которые повышенное количество ГД «ГКЖ-11Н» (0,1-0,4% от

массы ПЦ соответственно). При этом целесообразность и рациональность применения конкретного вида разработанной полифункциональной добавки для переходного слоя (КД1 – КД4) в технологии 3D-печати обусловлена требуемой продолжительностью технологического перерыва (таблица 1).

Таблица 1

Вид применяемой полифункциональной добавки КД-П для переходного слоя в 3D-печати в зависимости от требуемой продолжительности технологического перерыва

№ добавки	Требуемая продолжительность технологического перерыва (не более), ч	Фактические сроки схватывания, мин	
		Начало	Конец
КД1	3 часа	393	541
КД2	6 часов	489	662
КД3	9 часов	674	850
КД4	12 часов	808	925

Зависимость прочности сцепления слоев МЗБ основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки приведена на рисунке 1.

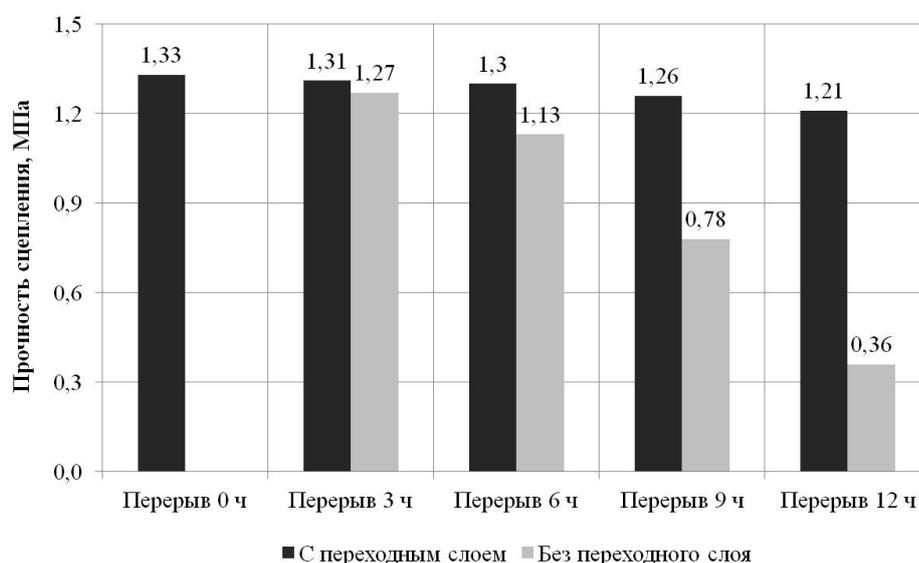


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления слоев МЗБ основного состава с переходным слоем от продолжительности твердения образцов и вида полифункциональной комплексной добавки (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Dependence of the adhesion strength of fine-grained concrete layers of the basic composition with the transition layer on the duration of hardening of samples and the type of multifunctional complex additive (illustration by the authors)

Устройство переходного слоя из модифицированных мелкозернистых бетонных смесей (рисунок 1) позволяет обеспечить высокие показатели адгезии слоев при продолжительных технологических перерывах. Так при продолжительности перерывов 3 и 6 ч величина сцепления базового слоя с переходными слоями, модифицированными КД1 и КД2, практически не снижается и равна 1,31 МПа и 1,3 МПа соответственно, что составляет 98,5% и 97,7% когезионной прочности сцепления слоев МЗБ базового состава, напечатанного без перерывов. При этом вышеуказанные значения прочности сцепления на 3,2% и 15% соответственно выше, чем в образцах без переходного слоя.

В ранее выполненных исследованиях установлено, что снижение величины адгезии напечатанных слоев МЗБ основного состава составляет 41,3% и 72,9% при продолжительности технологических перерывов 9 ч и 12 ч соответственно, что приводит к образованию в конструкции холодных швов. Устройство переходного слоя из МЗБ, модифицированного КД3 и КД4, позволяет существенно увеличить адгезию слоев при аналогичных значениях перерывов. Так величина сцепления базового слоя с переходными слоями, модифицированными КД3-П и КД4-П, при продолжительности технологических перерывов 9 ч и 12 ч равна 1,26 МПа и 1,21 МПа (рисунок 1), что

составляет 94,7% и 91% соответственно когезионной прочности сцепления слоев МЗБ основного состава, напечатанного без перерывов.

Таким образом, установлено, что устройство модифицированного переходного слоя при незначительном снижении прочности адгезии слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч, что обеспечивает совершенствование аддитивного строительного производства. Полученные результаты согласуются с исследованиями [18, 19].

На основе выполненных исследований разработана принципиальная технологическая схема аддитивного строительного производства из модифицированного МЗБ с увеличенной продолжительностью технологического перерыва (рисунок 2).

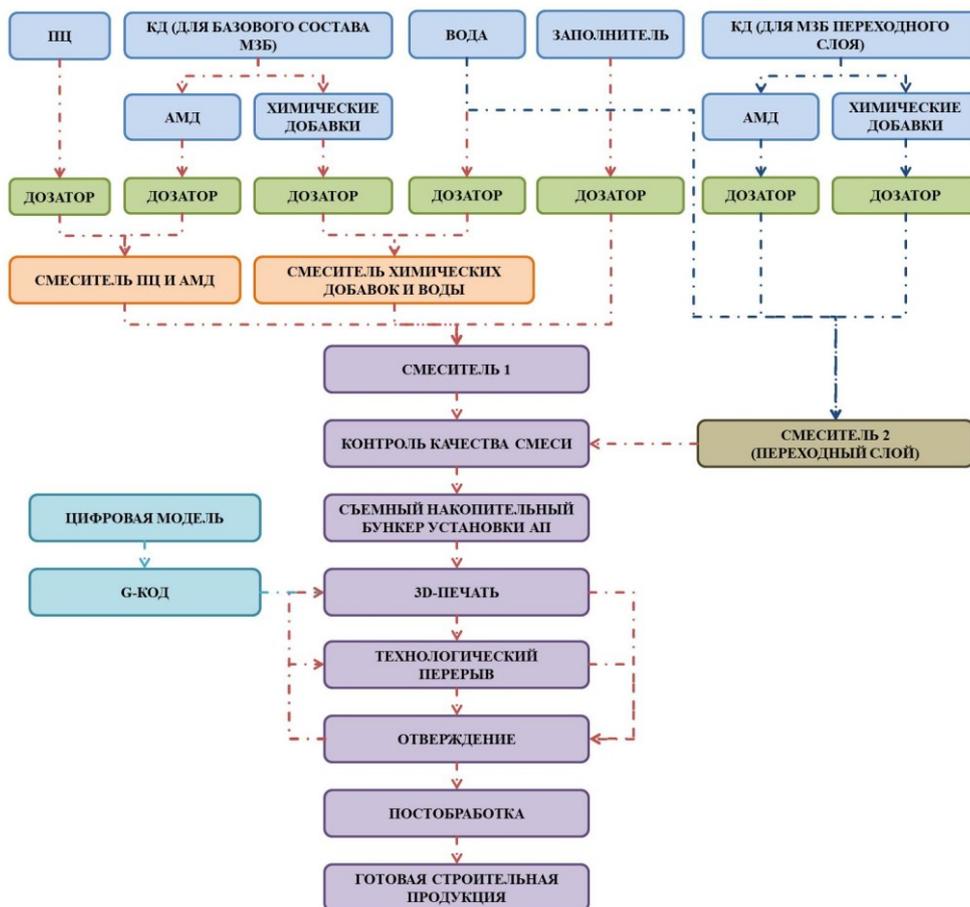


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема аддитивного производства строительной продукции из цементных МЗБ методом послойной экструзии с увеличенной продолжительностью технологического перерыва (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Principal technological diagram of the additive manufacturing for construction using fine-grained concrete by 3DCP with an increased duration of the technological break (illustration by the authors)

Разработанное технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, осуществляемое по разработанной принципиальной схеме (рисунок 2) и основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками МЗБС, уложенных до технологического перерыва, позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

4. Заключение

1. Выполнен анализ научных и практических исследований в области 3D-печати, направленных на разработку технологических решений по повышению уровня сцепления слоев в технологии 3D-печати, в том числе для длительных технологических

перерывах, на основе которого обоснована актуальность настоящих исследований, выявлены нерешенные задачи и определены рациональные направления их решения.

2. Установлено, что устройство переходного слоя из модифицированной бетонной смеси при незначительном снижении прочности сцепления слоев (1,5-9%) позволяет осуществлять продолжительные технологические перерывы в интервале 3-12 ч.

3. Разработано технологическое решение в аддитивном строительном производстве методом послойной экструзии, основанное на устройстве переходного слоя из модифицированных полифункциональными комплексными добавками МЗБС, уложенных до технологического перерыва, которое позволяет направленно регулировать его продолжительность в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высокого качества готовой строительной продукции.

Список литературы/ References

1. Иноземцев А. С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245 [Inozemcev A. S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction // Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19. Iss. 2. P. 216–245].
2. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные гипсоцементно-пуццолановые бетоны для 3D-печати // Строительные материалы. 2024. № 1–2. С. 79–89. [Muhametrahimov R.Kh., Rahimov R.Z., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified gypsum-cement-pozzolanic concretes for 3D printing // Construction Materials. 2024. Iss. 1–2. P. 79–89].
3. Строганов В. Ф., Амелъченко М. О., Мухаметрахимов Р. Х., Вдовин Е.А., Табаева Р.К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем – шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32 [Stroganov V. F., Amel'chenko M. O., Muhametrahimov R. Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increasing the level of adhesion of styrene-acrylic coatings modified with shungite filler when protecting building materials // Adhesives. Sealing materials. Technologies. 2021. Iss. 9. P. 29–32].
4. Barbosa M.S., dos Anjos M.A.S., Cabral K.C., Dias L.S. Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 341. P. 127775.
5. Dubov A., Ruben S., Korshikov V., Ivanova A., Yakovlev E. 3D Printing of Polymers with Continuous Fibers to Replace Steel Reinforcement and Structural Steel in Construction // Progress in additive manufacturing 2020. ASTM International. 2022. P. 165–179.
6. Dvorkin L., Konkol J., Marchuk V., Huts A. Effectiveness of Polymer Additives in Concrete for 3D Concrete Printing Using Fly Ash // Polymers. 2022. Vol. 14. Iss. 24. P. 5467.
7. Hass L., Bos F. Bending and Pull-Out Tests on a Novel Screw Type Reinforcement for Extrusion-Based 3D Printed Concrete. 2020. P. 632–645.
8. Krčma M., Škaroupka D., Vosynek P., Zikmund T., Kaiser J., Palousek D. Use of polymer concrete for large-scale 3D printing // Rapid Prototyping Journal. 2021. Vol. 27. Iss. 3. P. 465–474.
9. Marchment T., Sanjayan J. Penetration Reinforcing Method for 3D Concrete Printing. 2020. P. 680–690.
10. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Iss. 6.
11. Tao Y., Lesage K., De Schutter G., Van Tittelboom K. Adhesion studies in view of automated repair using 3D concrete printing // MATEC Web of Conferences. 2023. Vol. 378. P. 03003.
12. Yaxin Tao, Qiang Ren, Gieljan Vantighem, Karel Lesage, Kim Van Tittelboom, Yong Yuan, Wouter De Corte, Geert De Schutter. Extending 3D concrete printing to hard

- rock tunnel linings: Adhesion of fresh cementitious materials for different surface inclinations // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 149. P. 104787.
13. Vdovin E. A., Stroganov V. F. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures // *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020. Vol. 786. Iss. 1. P. 012065.
 14. Пат. 2794037 Российская Федерация, МПК E04B 2/84, B28B 1/00, B33Y 10/00. Способ 3D-печати бетоном с длительным технологическим перерывом / Мухаметрахимов Р. Х., Зиганшина Л. В. – заявл. 01.11.2022 : опубл. 11.04.2023 [Mukhametrahimov R. Kh., Ziganshina L. V. A method for 3D printing concrete with a long technological break. Patent RF. No. 2794037; 11.04.2023].
 15. Пат. 2795274 Российская Федерация, МПК E04G 21/02, E04B 2/84, B33Y 10/00, C04B 28/04, C04B 111/20. Способ 3D-печати модифицированной бетонной смесью / Мухаметрахимов Р.Х. – заявл. 01.11.2022 : опубл. 02.05.2023 [Mukhametrahimov R. Kh. Method of 3D printing with modified concrete mixture. Patent RF. No. 2795274; 02.05.2023].
 16. Пат. 2793497 Российская Федерация, МПК E04B 2/84, B28B 1/00, B33Y 10/00, C04B 28/04. Способ аддитивного производства в строительстве с длительным технологическим перерывом / Мухаметрахимов Р.Х.– заявл. 01.11.2022 : опубл. 04.04.2023 [Mukhametrahimov R. Kh. Additive manufacturing method in construction with a long technological break. Patent RF. No. 2793497; 04.04.2023].
 17. Пат. 2775131 Российская Федерация, МПК C04B 28/04. Бетонная смесь на основе цемента для строительной 3D-печати // Мухаметрахимов Р. Х., Зиганшина Л. В. – заявл. 30.12.2021 : опубл. 28.06.2022 [Mukhametrahimov R. Kh., Ziganshina L. V. Cement-based concrete mixture for construction 3D printing. Patent RF. No. 2775131; 28.06.2022].
 18. Wang Y., Qiu L. chao, Chen S. gui, Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 411. P. 134403
 19. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 143. P. 106386.

Информация об авторах

Мухаметрахимов Рустем Ханифович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Галаутдинов Альберт Радикович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Зиганшина Лилия Валиевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: lilya0503199@gmail.com

Information about the authors

Rustem Kh. Mukhametrakhimov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: muhametrahimov@mail.ru

Albert R. Galautdinov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Liliya V. Ziganshina, candidate of technical sciences, senior researcher, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: lilya0503199@gmail.com



УДК: 69.04

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.14

EDN: VEBYDG



Определение нормальных напряжений в металлических стержневых конструкциях при произвольном сочетании усилий и кручении с учетом пластических деформаций при циклическом нагружении

П.В. Еремеев^{1,2}, Г.Н. Шмелев¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

²АО Спецремпроект, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Работа тонкостенных металлических конструкций открытого профиля, распространенных в строительной практике, характеризуется значительным влиянием депланации сечения на несущую способность, что обуславливает актуальность исследований по определению напряженно-деформированного состояния сечений при изгибе и стесненном кручении с учетом пластических деформаций. Цель исследования заключалась в разработке численной математической модели на основе метода переменных параметров упругости, позволяющей с достаточной точностью определять нормальные напряжения сечений стержневых металлических конструкций с учетом пластических деформаций при стесненном кручении и циклическом нагружении. Задачами исследования являются: разработка численной математической модели на основе метода переменных параметров упругости; реализация математической модели в виде программы; верификация разработанной программы. В статье представлена математическая модель, позволяющая определить нормальные напряжения в стержневых металлических конструкциях при стесненном кручении с учетом развития пластических деформаций. Модель реализована в виде программы на языке программирования Python и верифицирована в упругой и пластической стадиях работы с аналитическим и численным (метод конечных элементов) решениями. Отклонения максимальных напряжений в сечении по методу переменных параметров упругости от аналитического и численного решений в упругой стадии составили не более 5%, что говорит о применимости рассматриваемого метода к решению задач совместного действия усилий изгибающего момента и бимоментов в упругой стадии работы. Распределение напряжений по сечению при пластических деформациях и последующей разгрузке по методу переменных параметров упругости в достаточной степени соответствует результатам метода конечных элементов, что свидетельствует о применимости предложенной модели для решения задач в упругопластической стадии при циклическом нагружении. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения расчетов при проектировании металлических конструкций, испытывающих совместное действие изгибающего момента и кручения.

Ключевые слова: стесненное кручение, метод переменных параметров упругости, упругопластические деформации

Для цитирования: Еремеев П.В., Шмелев Г.Н. Определение нормальных напряжений в металлических стержневых конструкциях при произвольном сочетании усилий и кручении с учетом пластических деформаций при циклическом нагружении // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 135-145, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.14, EDN: VEBYDG

Determination of normal stresses in metal rod structures under an arbitrary combination of forces and torsion, taking into account plastic deformations under cyclic loading

P.V. Ereemeev^{1,2}, G.N. Shmelev¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²JSC Spetsremproekt, Kazan, Russian Federation

Abstract. The work of thin-walled metal structures of an open profile, common in construction practice, is characterized by a significant effect of section deplaning on the bearing capacity, which determines the relevance of research to determine the stress-strain state of sections during bending and constrained torsion, taking into account plastic deformations. The purpose of the study was to develop a numerical mathematical model based on the method of variable elasticity parameters, which allows sufficiently accurate determination of the normal stresses of the cross sections of rod metal structures, taking into account plastic deformations under constrained torsion and cyclic loading. The objectives of the research are: development of a numerical mathematical model based on the method of variable elasticity parameters; implementation of a mathematical model in the form of a program; verification of the developed program. The article presents a mathematical model that allows us to determine the normal stresses in rod metal structures under constrained torsion, taking into account the development of plastic deformations. The model is implemented as a program in the Python programming language and verified in the elastic and plastic stages of working with analytical and numerical (finite element method) solutions. Deviations of the maximum stresses in the cross section according to the method of variable elasticity parameters from analytical and numerical solutions in the elastic stage amounted to no more than 5%, which indicates the applicability of the method under consideration to solving problems of the combined action of bending moment and bimoment forces in the elastic stage of work. The stress distribution over the cross section during plastic deformations and subsequent unloading using the method of variable elasticity parameters is sufficiently consistent with the results of the finite element method, which indicates the applicability of the proposed model to solve problems in the elastoplastic stage under cyclic loading. The results obtained can be used to refine calculations in the design of metal structures experiencing the combined action of bending moment and torsion.

Keywords: Constrained torsion, method of variable elastic parameters, elastoplastic deformations

For citation: Ereemeev P.V., Shmelev G.N. Determination of normal stresses in metal rod structures under an arbitrary combination of forces and torsion, taking into account plastic deformations under cyclic loading // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 135-145, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.14, EDN: VEBYDG

1. Введение

Работа тонкостенных металлических конструкций при стесненном кручении характеризуется депланацией сечения. Стесненное кручение, в той или иной степени, возникает в большинстве стержневых металлических конструкций, из-за случайных эксцентриситетов приложения нагрузок, сопряжения конструктивных элементов и т.п., что приводит к несовпадению направления нагрузки с центром изгиба. Для обеспечения надежного и экономичного проектирования необходимы достаточно точные и простые в применении методы расчета.

Экспериментально установлено [1], что упругопластическому состоянию конструкции при кручении соответствуют значительно большие предельные усилия, чем упругому. Это обуславливает необходимость соответствующих исследований по определению напряженно-деформированного состояния (НДС).

Решение задачи определения НДС металлических стержневых конструкций при произвольном сочетании усилий и кручении в упругой постановке предложено В.З.

Власовым. Напряжения от каждой компоненты усилий складываются для определения итогового НДС на основе принципа суперпозиции, а напряжения от стесненного кручения определяются по закону распределения секториальных площадей. При пластическом деформировании принцип суперпозиции при определении НДС не действителен, что требует применения численных методов расчета.

В исследовании [2] показано, что при упругопластическом деформировании за предельное состояние двутаврового сечения можно принять достижение шарнира пластичности в полках. В статье [3] предложен практический метод определения несущей способности двутавровых балок в пластической стадии при одновременном действии крутящего и изгибающего момента, проведены экспериментальные исследования по определению возможности его применения. В работе [4] предложен расчет тонкостенных стержней по деформированной схеме. В статьях [5, 6] экспериментально и численно рассмотрена работа балки, воспринимающей кручение. Полученные теоретические данные по методу конечных элементов имеют хорошую сходимость с экспериментальными результатами. Авторами статьи [7] разработан алгоритм корректировки бимоента, позволяющий избежать нарушение баланса бимоментов в соединениях рамных систем. Влияние жесткости узловых соединений на устойчивость и прочность тонкостенных конструкций с учетом бимоента рассмотрено в [8]. Смешанный метод конечных элементов в вариационной постановке на основе теории полусдвигных тонкостенных стержней Сливкера представлен в статье [9]. В статьях [10, 11] рассмотрено поведение тонкостенных участков стержня при ограниченном кручении. Исследованию кручения стержней методом конечных граничных элементов посвящены работы [12-14]. Влияние соединений на работу холодногнутых профилей при кручении рассмотрено в статье [15]. Современные исследования также посвящены решению задачи кручения для неоднородных стержней [16, 17], потери устойчивости наноразмерных стержней при действии продольной силы и кручения [18], задач динамики [19]. Закритическое поведение сжатых стержней с нелинейно упругими опорами рассмотрено в [20].

Цель исследования заключается в разработке численной математической модели на основе метода переменных параметров упругости (МППУ), позволяющей с достаточной точностью определять нормальные напряжения сечений стержневых металлических конструкций с учетом пластических деформаций при стесненном кручении.

Задачами исследования являются:

1. формулирование положений математической модели на основе метода переменных параметров упругости;
2. реализация математической модели в виде программы;
3. верификация разработанной программы.

2. Материалы и методы

2.1 Описание модели

Ранее авторами была рассмотрена нелинейная деформационная модель сечения, позволяющая определять нормальные напряжения при произвольном знакопеременном упругопластическом нагружении конструкции с учетом остаточных напряжений [21]. Дополним ее с целью учета стесненного кручения.

Проведем триангуляцию рассматриваемого сечения с фиксацией принадлежности элементарных площадок к пластинам сечения.

Уравнения равновесия в сечении записываются на приращения усилий, причем в пределах каждого приращения соотношение напряжений и деформаций по диаграмме работы материала должно быть однозначно определено:

$$\Delta M_x = \sum_i \sigma_i \cdot A_i \cdot Z_{xi}, \quad (1)$$

$$\Delta M_y = \sum_i \sigma_i \cdot A_i \cdot Z_{yi}, \quad (2)$$

$$\Delta N = \sum_i \sigma_i \cdot A_i, \quad (3)$$

где ΔM_x , ΔM_y , ΔN приращения соответственно усилий изгибающего момента относительно оси x , изгибающего момента относительно оси y и продольной силы;

σ_i – приращение напряжений в i -й элементарной площадке;

A_i – площадь i -й элементарной площадки;

Z_{xi} – расстояние от i -й элементарной площадки до принятой оси x ;

Z_{yi} – расстояние от i -й элементарной площадки до принятой оси y .

Уравнение, определяющее распределение деформаций по сечению элемента, дополняется деформацией треугольника с предыдущей стадии нагружения:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^H + \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{xi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{yi} + \varepsilon_0^k + \frac{1}{r_x^k} \cdot Z_{xi} + \frac{1}{r_y^k} \cdot Z_{yi}, \quad (4)$$

где ε_i^H – деформация i -й элементарной площадки с предыдущей стадии нагружения;

ε_i – деформация i -й элементарной площадки;

$\frac{1}{r_x}, \frac{1}{r_y}, \varepsilon_0$ – кривизны и относительная деформация по нейтральной оси сечения;

$\frac{1}{r_x^k}, \frac{1}{r_y^k}, \varepsilon_0^k$ – кривизны и относительная деформация по нейтральной оси сечения,

вызываемые бимоментом;

Z_{xi}, Z_{yi} – расстояния от i -й элементарной площадки до осей x и y соответственно.

Общие уравнения, связывающее напряжения и относительные деформации, и уравнения, определяющие коэффициенты жесткости, принимаются по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»:

$$\sigma_i = E \cdot \nu_i \cdot \varepsilon_i, \quad (5)$$

$$D_{11} = \sum_i A_i \cdot Z_{xi}^2 \cdot E \cdot \nu_i \quad (6)$$

$$D_{13} = \sum_i A_i \cdot Z_{xi} \cdot E \cdot \nu_i, \quad (7)$$

$$D_{22} = \sum_i A_i \cdot Z_{yi}^2 \cdot E \cdot \nu_i, \quad (8)$$

$$D_{12} = \sum_i A_i \cdot Z_{xi} \cdot Z_{yi} \cdot E \cdot \nu_i, \quad (9)$$

$$D_{23} = \sum_i A_i \cdot Z_{yi} \cdot E \cdot \nu_i, \quad (10)$$

$$D_{33} = \sum_i A_i \cdot E \cdot \nu_i, \quad (11)$$

где D_{ij} – коэффициенты жесткости;

ν_i – коэффициент, корректирующий модуль упругости на каждой итерации расчета.

Дополнительные изгибающие моменты от продольной силы и усилия по напряжениям определяются в приращениях:

$$\Delta M_x = \Delta M_{xd} + \Delta N \cdot e_x, \quad (12)$$

$$\Delta M_y = \Delta M_{yd} + \Delta N \cdot e_y, \quad (13)$$

$$\Delta M_x = D_{11} \Delta \frac{1}{r_x} + D_{12} \Delta \frac{1}{r_y} + D_{13} \Delta \varepsilon_0, \quad (14)$$

$$\Delta M_y = D_{12} \Delta \frac{1}{r_x} + D_{22} \Delta \frac{1}{r_y} + D_{23} \Delta \varepsilon_0, \quad (15)$$

$$\Delta N = D_{13} \Delta \frac{1}{r_x} + D_{23} \Delta \frac{1}{r_y} + D_{33} \Delta \varepsilon_0. \quad (16)$$

Для учета бимоента, дополнительно в рамках одной итерации необходимо выполнить следующие вычисления для каждой пластинки сечения, испытывающей воздействие биоента

$$D_{11}^k = \sum_i A_{k,i} \cdot Z_{k,xi}^2 \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (17)$$

$$D_{13}^k = \sum_{i=k} A_{k,i} \cdot Z_{k,xi} \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (18)$$

$$D_{22}^k = \sum_{i=k} A_{k,i} \cdot Z_{k,yi}^2 \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (19)$$

$$D_{12}^k = \sum_{i=k} A_{k,i} \cdot Z_{k,xi} \cdot Z_{k,yi} \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (20)$$

$$D_{23}^k = \sum_{i=k} A_{k,i} \cdot Z_{k,yi} \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (21)$$

$$D_{33}^k = \sum_{i=k} A_{k,i} \cdot E \cdot \nu_{k,i}, \quad (22)$$

$$\Delta M_{\omega,x}^k = D_{11}^k \Delta \frac{1}{r_x^k} + D_{12}^k \Delta \frac{1}{r_y^k} + D_{13}^k \Delta \varepsilon_0^k, \quad (23)$$

$$\Delta M_{\omega,y}^k = D_{12}^k \Delta \frac{1}{r_x^k} + D_{22}^k \Delta \frac{1}{r_y^k} + D_{23}^k \varepsilon_0^k, \quad (24)$$

$$\Delta N_{\omega}^k = D_{13}^k \Delta \frac{1}{r_x^k} + D_{23}^k \Delta \frac{1}{r_y^k} + D_{33}^k \varepsilon_0^k. \quad (25)$$

где ΔM_{ω} – приращение изгибающего момента в k -й пластинке, вызываемого бимоментом;

D_{ij}^k – коэффициенты жесткости k -й пластинки на восприятие бимоента:

$\Delta M_{\omega,x}^k, \Delta M_{\omega,y}^k, \Delta N_{\omega}^k$ – приращения усилий в k -й пластинке, вызываемые бимоментом и определяемые по закону распределения секториальных площадей.

Коэффициенты ν_i определяются по формуле:

$$\nu_i = \frac{\sigma_i^H - \sigma_i}{\varepsilon_i^H - \varepsilon_i} * \frac{1}{E}. \quad (26)$$

2.2 Верификация модели

Описанная выше модель в полном объеме реализована в виде программы на языке программирования Python. Сравним результаты расчета по разработанной программе с аналитическими и численными (метод конечных элементов) решениями в упругой и упругопластической постановках.

Модель материала при упругопластическом анализе принята по диаграмме Прандтля.

Рассмотрим двутавровое сечение, воспринимающее усилия изгибающего момента в плоскости наибольшей жесткости и стесненного кручения. Аналитическое решение этой задачи в упругой области деформирования имеется в книге «Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций» Бычкова Д.В. Размеры сечения: полки 220 x 20 мм, стенка 700 x 10 мм. Сечение воспринимает изгибающий момент $M_x = 324 \text{ кН} \cdot \text{м}$, крутящий момент $M_x = 2.868 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и бимомент $B_{\omega} = 8.048 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$.

По теории В.З. Власова суммарные напряжения в крайней фибре сечения составляют:

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_{\omega} = 85,63 + 70,64 = 156,27 \text{ МПа}. \quad (27)$$

Смоделируем эту задачу методом конечных элементов в программном комплексе Midas Civil. Геометрические параметры и нагрузки соответствуют исходным данным, представленным выше. Расчет выполнен в упругой постановке, геометрическая нелинейность не учитывалась. Эпюра нормальных напряжений в сечении заделки представлена на рис. 1 в).

Результаты расчетов занесены в таблицу.

Рассмотрим решение этой задачи в разработанной программе на основе описанной модели. Размер элементарного участка при триангуляции принят не более 5 мм. На рис. 2 представлены результаты расчета – распределение напряжений по сечению.

Для двутаврового сечения усилия от стесненного кручения по теории В.З. Власова в стенке нулевые, а в полках:

$$\Delta M_{\omega,x}^k = 0, \quad (28)$$

$$\Delta M_{\omega,y}^k = \frac{B_w}{h} = \frac{8.048 \text{ кН} \cdot \text{м}^2}{0.72 \text{ м}} = 11.18 \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (29)$$

$$\Delta N_{\omega}^k = 0, \quad (30)$$

где h – расстояние между полками двутавра;

B_w – бимомент в сечении;

В упругопластической стадии выполнено сравнение результатов расчета по представленной модели с МКЭ. Рассмотрено 3 варианта предела текучести: 120, 94 и 87 МПа. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 3.

На рис. 4 представлены остаточные напряжения, полученные при разгрузке варианта с пределом текучести 87 МПа по МППУ и МКЭ.

На рис. 5 а) показана кривая изгибающий момент - кривизна при разгрузке сечения.

На рис. 5 б) показана кривая изгибающий момент - кривизна при нагружении 10 полных циклов в диапазоне изгибающего момента от -306.18 кН*м до 306.18 кН*м и изгибающего момента полки от стесненного кручения от -10.565 кН*м до 10.565 кН*м.

3. Результаты

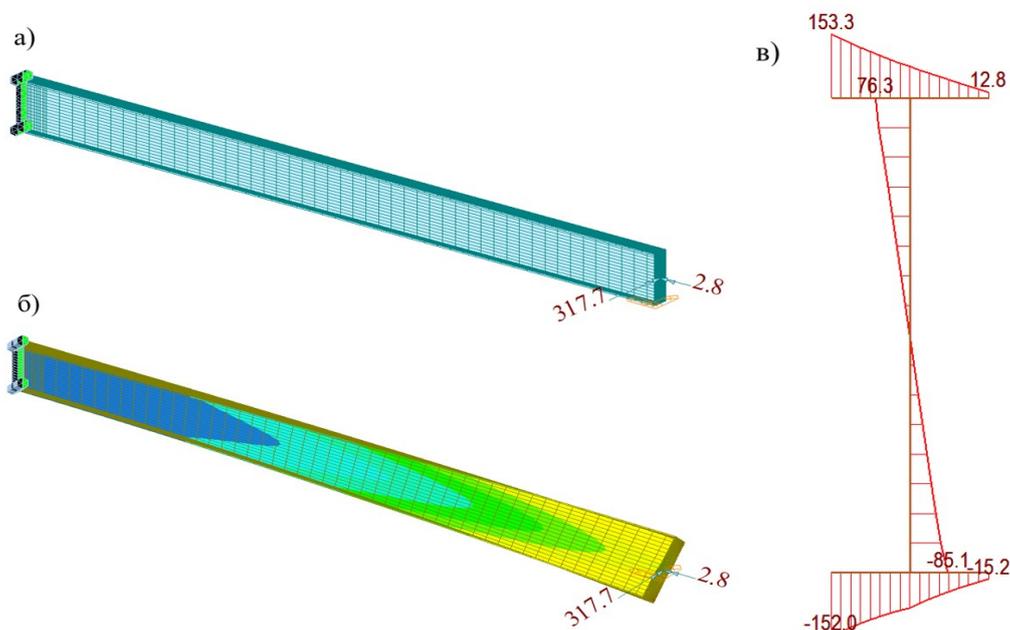


Рис. 1. Результаты расчета по МКЭ. а) Расчетная модель, б) деформированный вид расчетной модели, в) эпюры напряжений в сечении у заделки (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Calculation results for FEM. a) Calculation model, b) deformed view of the calculation model, c) stress diagrams in the section at the sealing (illustration by the authors)

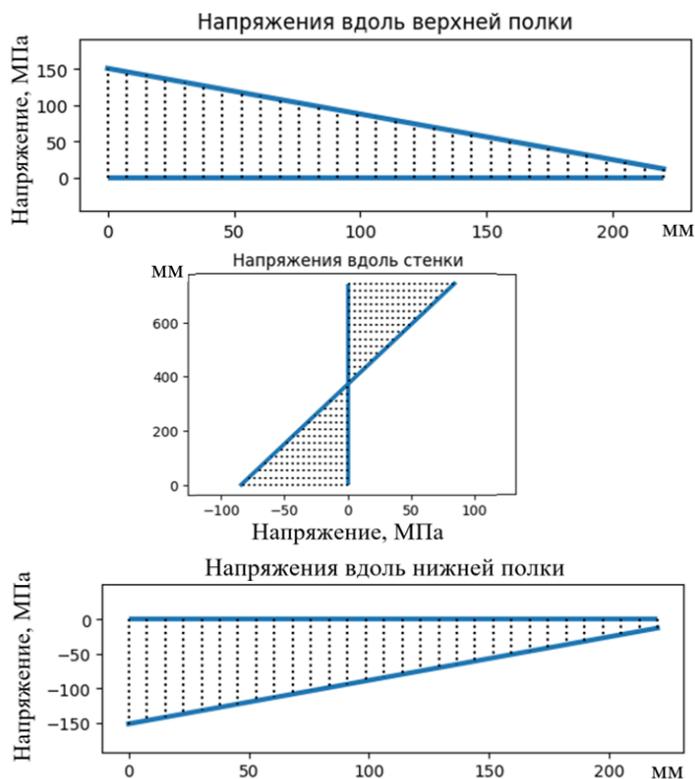


Рис. 2. Результаты расчета по МППУ (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. The results of the calculation according to the MPPU (illustration by the authors)

Таблица

Результаты расчетов в упругой стадии

	МППУ	Аналитическое решение	МКЭ	Отклонение МППУ от аналитического решения, %	Отклонение МППУ от МКЭ, %
Напряжения в крайней фибре, МПа	150,86	156,27	153,3	3,46	1,59

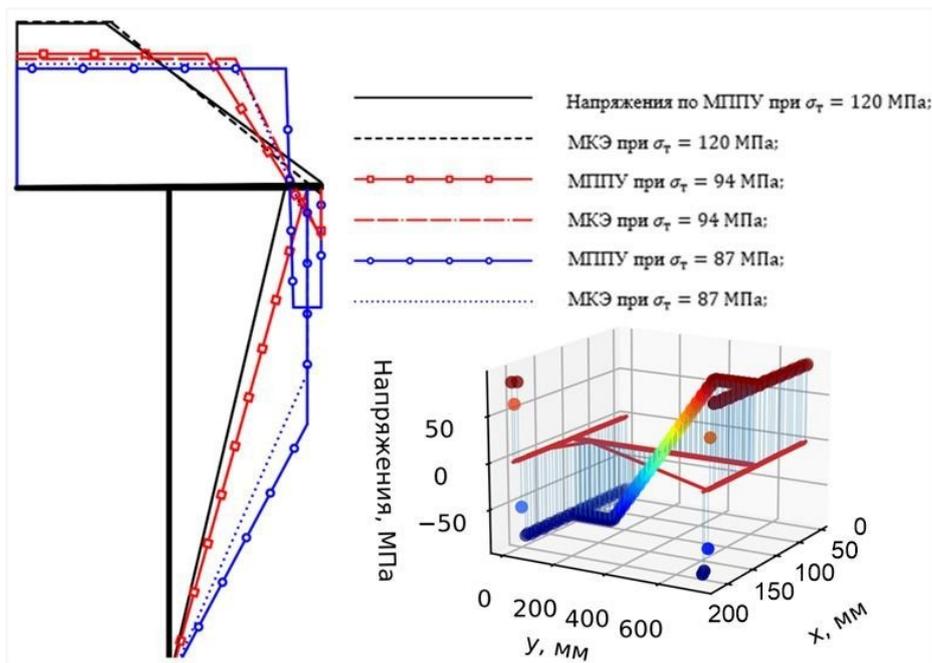


Рис. 3. Результаты расчетов в упруго-пластической стадии (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Calculation results in the elastic-plastic stage (illustration by the authors)

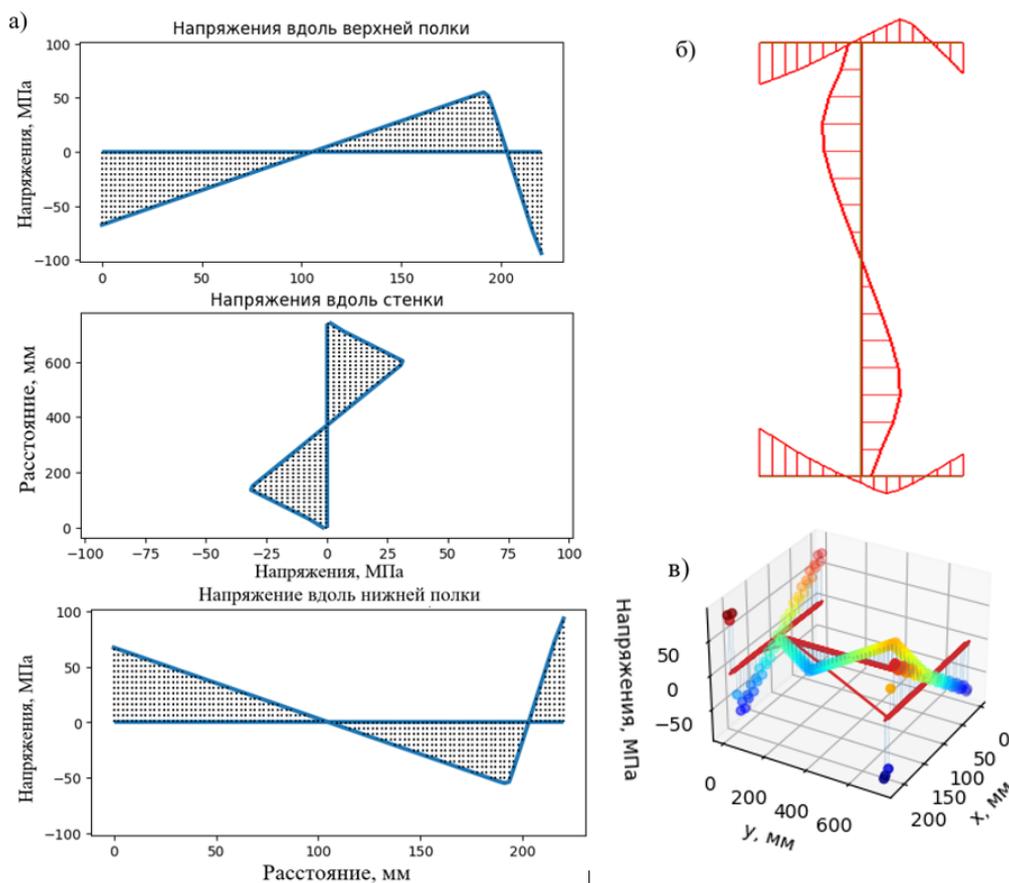


Рис. 4. Результаты расчетов при разгрузке. а) эпюры напряжений по МППУ, б) эпюры напряжений по МКЭ, в) объемное распределение напряжений по МППУ (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. The results of calculations during unloading. a) stress diagrams according to MPPU, b) stress diagrams according to FEM, c) volumetric stress distribution according to MPPU (illustration by the authors)

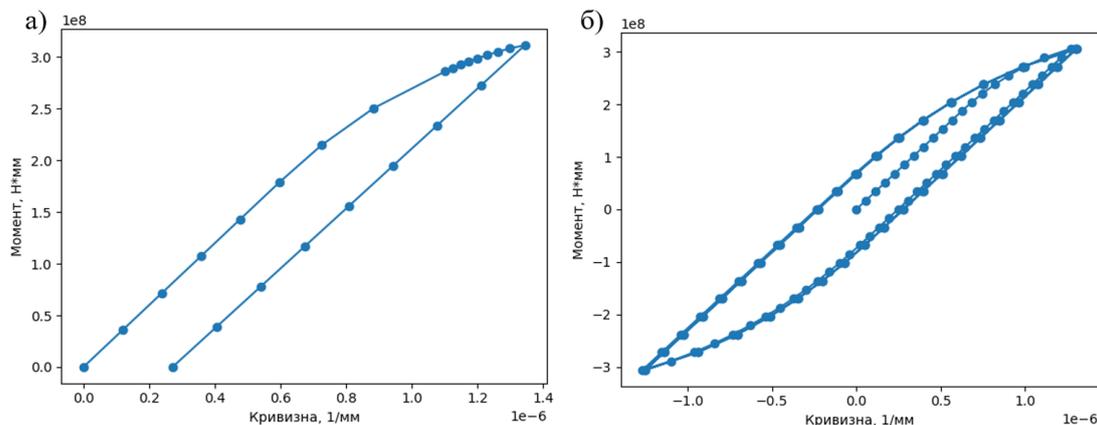


Рис. 5. Кривые нагружения по МППУ а) при разгрузке, б) при циклическом нагружении (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Loading curves according to the MPPU a) during unloading, b) during cyclic loading (illustration by the authors)

4. Обсуждение

Отклонения максимальных напряжений в сечении по МППУ от аналитического и численного решений составили не более 5%, что говорит о применимости рассматриваемого метода к решению задач совместного действия усилий изгибающего момента и бимоента в упругой стадии работы. Полученные отклонения не выше отклонений в экспериментальных исследованиях других авторов [5, 6].

Как видно из рис. 3 распределение напряжений по сечению по МППУ в достаточной степени соответствует результатам МКЭ, что свидетельствует о применимости предложенной модели для решения задач в упругопластической стадии. Некоторое отклонение связано с тем, что по МКЭ работа материала в пластической стадии принимается по эквивалентным напряжениям, что приводит к тому, что нормальные напряжения несколько превышают предел упругости (эквивалентные напряжения при этом равны пределу упругости). За исключением этого фактора площади эпюр нормальных напряжений по МППУ и МКЭ совпадают.

На рис. 4 представлено сравнение остаточных напряжений, полученных при разгрузке по МППУ и МКЭ. Форма эпюр по двум методам совпадает, что свидетельствует о применимости рассматриваемого метода при решении задач циклического нагружения.

Модель позволяет помимо рассмотренных случаев получить распределение нормальных напряжений при их произвольном начальном распределении (остаточные напряжения) и стадийном нагружении (разгрузении). Результаты такого расчета могут быть применены при оценке малоциклового прочностии (задачи приспособляемости), многоциклового прочностии (задачи выносливости) и местной устойчивости.

5. Заключение

1. Математическая модель на основе дополненного метода переменных параметров упругости позволяет в стадийной постановке с учетом остаточных напряжений и пластических деформаций определять напряженно деформированное состояние стержневых металлических конструкций при произвольном сочетании усилий изгибающих моментов, продольной силы и бимоментов.
2. Представленная модель реализована в виде программы на языке Python с целью ее верификации на аналитических и численных (МКЭ) решениях.
3. Полученные результаты показали хорошую сходимость и свидетельствуют о применимости рассматриваемого метода.

Полученные результаты могут иметь практическое применение в строительной практике при выполнении упругопластических расчетов металлических конструкций.

В дальнейшем авторы намерены рассмотреть влияние остаточных напряжений по различным моделям на несущую способность металлических стержней при восприятии изгибающего момента и стесненного кручения.

Список литературы

1. Boulton, N.S. Plastic twisting and bending of an I-section in which warp is restricted // N.S. Boulton // Int. J. Mech. Sci. - 1962. - Vol. 4. - P. 491-502.
2. Pi Y.L., Trahair N.S. Inelastic torsion of steel I-beams // Research Report No. R679. The University of Sydney. 1993
3. Туснин А.М., Прокич М. Работа симметричных двутавровых сечений при развитии пластических деформаций и действии изгибающего момента и бимоментов // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5(49). С. 44-53. DOI: 10.5862/MCE.49.5. [Tusnin A.M., Prokich M. The work of symmetrical I-sections in the development of plastic deformations and the action of bending moment and bimoment // Construction and engineering journal. 2014. No 5(49). P. 44-53. DOI: 10.5862/MCE.49.5.]
4. Белый, Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр. (Строительная механика сооружений). - 1983. - № 42. - С. 40-48. [Bely, G.I. Calculation of elastic-plastic thin-walled rods according to a spatially deformable scheme // Inter-university theatrical collection of works (Construction mechanics of structures). - 1983. - No. 42. - P. 40-48.]
5. Gebre T. H., Galishnikova V. V., Lebed E. V. Experimental and numerical investigation of thin-walled I-section beam under bending and torsion // Structural Mechanics of

- Engineering Constructions and Buildings. – 2022. – Vol. 18, No. 4. – P. 341-350. – DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-341-350. – EDN MDQQNP.
6. Gebre T., Galishnikova V., Lebed E., Tupikova E. Modelling of thin-walled members with restrained torsion considering the section properties // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 2(118). – P. 11806. – DOI 10.34910/MCE.118.6. – EDN LLEBKS.
 7. Serpik, I., Shkolyarenko R. Algorithm of correcting bimoments in calculations of thin-walled bar systems // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 7(107). – P. 10706. – DOI 10.34910/MCE.107.6. – EDN SIRSTV.
 8. Atavin I. V., Melnikov B. E., Semenov A. S. Influence of stiffness of node on stability and strength of thin-walled structure // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 4(80). – P. 48-61. – DOI 10.18720/MCE.80.5. – EDN UYQGNA.
 9. Lalin V. V., Rybakov V. A., Ivanov S. S., Azarov A. A. Mixed finite-element method in V.I. Slivker's semi-shear thin-walled bar theory // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – No. 5(89). – P. 79-93. – DOI 10.18720/MCE.89.7. – EDN YUKBRU.
 10. Galishnikova, V. The behaviour of thin-walled beam with restrained torsion / V. Galishnikova, T. H. Gebre // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 2(110). – P. 11009. – DOI 10.34910/MCE.110.9. – EDN DHUYLB.
 11. Galishnikova, V. V., Gebre T. H. Finite Element Analysis for Thin-Walled Member Subjected to Combined Loading // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18, No. 3. – P. 65-77. – DOI 10.22337/2587-9618-2022-18-3-65-77. – EDN SXRWQV.
 12. Lalin, V. V., Semenov D. A. Torsion problem: stress statement and solution by the boundary element method // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2023. – Vol. 19, No. 4. – P. 339-348. – DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-4-339-348. – EDN WXVNUL.
 13. Dumont N.A. Complex-variable, high-precision formulation of the consistent boundary element method for 2D potential and elasticity problems. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023;152:552–574. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.04.024>
 14. Dumont N.A. The consistent boundary element method for potential and elasticity: Part I – Formulation and convergence theorem. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023;149:127–142. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.01.017>
 15. Selyantsev, I. M., Tusnin A. Cold-formed steel joints with partial warping restraint // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 1(101). – P. 10101. – DOI 10.34910/MCE.101.1. – EDN CHLVKH.
 16. Chen H., Gomez J., Pindera M.J. Saint Venant's torsion of homogeneous and composite bars by the finite volume method. Composite Structures. 2020;242:112–128. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112128>
 17. Chen K.H., Kao J.H., Chen J.T., Liao J.F. A new error estimation technique for solving torsion bar problem with inclusion by using BEM. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2020;115:168–211. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.02.012>
 18. Ma X., Kiani K. Spatially nonlocal instability modeling of torsionally loaded nanobeams. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023;154:29–46. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.05.012>
 19. Labaki J., A Barros P.L., Mesquita E. A model of the time-harmonic torsional response of piled plates using an IBEM-FEM coupling. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2021;125:241–249. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.01.010>
 20. Каюмов, Р. А. Закритическое поведение сжатых стержней с нелинейно упругими опорами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 23-31. – DOI 10.15593/perm.mech/2022.3.03. – EDN OERASD. [Kayumov, R. A. Supercritical behavior of compressed rods with non-linearly elastic supports // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. – 2022. – No. 3. – P. 23-31. – DOI 10.15593/perm.mech/2022.3.03. – EDN OERASD.]

21. Еремеев, П. В., Шмелев Г. Н. Применение метода переменных параметров упругости при решении задач знакопеременного упруго-пластического нагружения металлических конструкций с учетом остаточных напряжений // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023. – № 6(311). – С. 2-10. – DOI 10.37538/0039-2383.2023.6.2.10. – EDN MIPPXU. [Eremeev, P. V. Application of the method of variable elasticity parameters in solving problems of alternating elastic-plastic loading of metal structures taking into account residual stresses / P. V. Eremeev, G. N. Shmelev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2023. – № 6(311). – P. 2-10. – DOI 10.37538/0039-2383.2023.6.2.10. – EDN MIPPXU.]

Информация об авторах

Павел Валерьевич Еремеев, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavil-66@inbox.ru

Геннадий Николаевич Шмелев, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: gn.shmelev@mail.com

Information about the authors

Pavel V. Eremeev, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

E-mail: pavil-66@inbox.ru

Genadij N. Shmelev, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

E-mail: gn.shmelev@mail.ru



Планирование перспективных направлений развития газораспределительной системы

Т. Н. Белоглазова¹, Т. Н. Романова¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация: Основные направления использования газового топлива (промышленность, энергетика, бытовые цели, отопление) имеют свои особенности. Для различных категорий потребителей требуются обоснованные объемы газа при заданном давлении; потребление газа по территориям неравномерно и зависит от количества и разнообразия потребителей. Планирование структуры системы газоснабжения осуществляется на принципах надежности, экологической безопасности, социальной значимости, экономической эффективности. Работа посвящена повышению надежности системы газоснабжения в период долгосрочного планирования для жилой и общественной зоны стандартного функционального развития. Цель работы – усовершенствование технологии распределения природного газа на основе разработки оптимальной структуры системы газоснабжения. Задачей исследования является выявление взаимосвязей между структурой газораспределительных сетей территорий и планировочным зонированием территории, природно-климатическими факторами, объемами потребления газа.

Наиболее существенным результатом является методическое обоснование критерия принятия перспективных решений структуры системы газоснабжения. По технико-экономическим показателям выявлена тенденция увеличения материальной характеристики системы газоснабжения в зависимости от плотности застройки. Расчет системы газоснабжения производится с учетом нагрузки для теплоснабжения и осуществляется на основе модели равномерно распределенного расхода газа по участку. Данная расчетная модель позволяет обеспечить экономическую эффективность проектов газоснабжения в условиях поэтапного ввода в эксплуатацию участков сети. Новизна результатов заключается в усовершенствовании метода планирования развития системы газоснабжения в условиях дифференцированной плотности проживания населения. Для строительной отрасли повышается возможность эффективности вкладываемых средств в развитие инфраструктуры территорий в зависимости от плотности застройки.

Ключевые слова: природный газ, пункт регулирования давления газа, плотность населения, развитие территорий, инфраструктура, функциональные зоны.

Для цитирования: Белоглазова Т.Н., Романова Т.Н. Планирование перспективных направлений развития газораспределительной системы // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 146-156, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.15, EDN: WDBUQN

Planning of perspective directions of gas distribution system development

T. N. Beloglazova¹, T. N. Romanova¹

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

Abstract: The main areas of gas fuel use (industry, energy engineering, domestic purposes, heating) have their own characteristics. Different categories of consumers require reasonable volumes of gas at a given pressure; gas consumption is uneven across territories and depends on

the number and variety of consumers. Planning of the structure of the gas supply system is carried out on the principles of reliability, environmental safety, social significance and economic efficiency. The work is devoted to improving the reliability of the gas supply system during the period of long-term planning for residential and public areas of standard functional development. The goal of the work is to improve the technology of natural gas distribution based on the development of the optimal structure of the gas supply system. The objective of the study is to identify the relationships between the structure of gas distribution networks of territories and the planning zoning of the territory, natural and climatic factors and volumes of gas consumption.

The most significant result is the methodological substantiation of the criterion for making long-term decisions on the structure of the gas supply system. Based on technical and economic indicators, a tendency has been identified to increase the material characteristics of the gas supply system depending on the building density. The calculation of the gas supply system is carried out taking into account the load for heat supply on the basis of the model of uniformly distributed gas flow across the site.

This calculation model makes it possible to ensure the economic efficiency of gas supply projects under the conditions of phased commissioning of network sections. The novelty of the results lies in the improvement of the method for planning the development of the gas supply system in conditions of differentiated population density.

The possibility of efficiency of investments in the development of infrastructure of territories increases depending on the density of development.

Keywords: natural gas, gas pressure control point, population density, territorial development, infrastructure, functional areas

For citation: Beloglazova T. N., Romanova T. N. Planning of perspective directions of gas distribution system development // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 146-156, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.15, EDN: WDBUQN

1. Введение

Энергетические системы для регионов страны являются необходимыми компонентами экономической, социальной, технологической структуры. Устойчивое развитие энергетического сектора является приоритетом в стратегическом развитии государства [1–3]. На основе систем обеспечения различными видами энергоресурсов создается энергетическая безопасность экономики в целом. Для всех регионов мира тенденция уменьшения потребления органического топлива связана со снижением уровня экономического развития.

Научно-технический процесс развития стран мира в современных условиях невозможен без достаточного количества органических видов топлива, несмотря на расширение использования альтернативных источников энергии [4–6]. Природный газ, как один из видов органических ресурсов, достиг в последние 50 лет значительных объемов потребления, что стало возможным при освоении технологии создания систем трубопроводного транспорта и транспортировки в сжиженном виде [7–9]. Трубопроводный транспорт обладает технологическими и экономическими преимуществами для транспортировки на короткие и средние расстояния [10]. В России в большинстве регионов преобладающим видом органического топлива для промышленности и энергетики является газ, в то же время сохраняется неравномерность уровня газификации регионов [11]. Одним из условий устойчивого развития экономики российских регионов является строительство новых и модернизация существующих газораспределительных систем. Вложения в развитие газовой инфраструктуры обеспечивает условия для увеличения потребления газа на внутреннем рынке. Структурные изменения в системе газораспределения и газопотребления являются результатом влияния законодательных, экономических, технологических факторов. Формирование надежной структуры газораспределительных сетей целесообразно осуществлять с учетом региональных, экономических факторов и природно-климатических особенностей [12,13].

Целью исследования является определение структуры газораспределительной системы для повышения надежности технологии энергообеспечения потребителей. Цель достигается за счет решения следующих задач: на примере города Перми произведен анализ структуры функциональных зон территориального развития; выполнен анализ годового объема потребления газа в зоне селитебного назначения на теплоснабжение и хозяйственное использование газа на основе природно-климатических факторов; произведен анализ и выявлена взаимосвязь структуры газораспределительной сети на основе математической модели для зоны с одинаковой площадью и разной плотностью застройки.

2. Материалы и методы

Развитие структуры газораспределительной системы производится с учетом перспективного планирования и функционального зонирования объекта газификации [14]. Характер потребления газа для каждого объекта находится в прямой зависимости от перспективы экономического развития территории, поэтому исследование произведено на примере города Перми (Россия). На основе плана развития территорий рассмотрен состав и соотношение функциональных зон. Различают зоны селитебного назначения, производственно-коммунальную, промышленно-торговую, а так же территории ситуативного проектирования (ТСП): общественно-делового назначения (ТСП-ОД), зону рекреационных и специальных объектов (ТСП-Р), зону экологического природного ландшафта (ТСП-ЭП), зону сельскохозяйственного использования (ТСП-СХ). Наличие и развитие зон, их взаимное расположение определяет как структуру, так и характер потребления газа на данной территории. На основе объемов потребления газа и возможности подключения к трубопроводам производится анализ источников газоснабжения и возможных вариантов структуры газораспределительных сетей по давлению и протяженности. Структура газораспределительных сетей имеет многоступенчатое строение [15, 16].

Годовое и расчетное часовое потребление газа являются основными факторами, оказывающих влияние на структуру газораспределительных сетей территории. Как правило, территории имеют сложившуюся ситуацию расположения функциональных зон; для ряда регионов уже имеет место функционирующая газораспределительная сеть. Особенностью регионов России в современных условиях при использовании магистрального газа является существенное изменение в характере газопотребления в период с 1991 по 2021 годы. В период развития структуры газораспределительных сетей преобладало промышленное потребление и централизованное теплоснабжение. Изменение объема потребления газового топлива связано с изменением объема производства промышленных объектов, строительством объектов с современным уровнем тепловой защиты [17], повышением энергоэффективности технологического оборудования.

Процессы модернизации существующей структуры системы газораспределения основываются на анализе перспективного использования газа производственными объектами и потребителями жилой зоны.

Данные по зонам функциональной застройки, т.н. стандартным территориям нормирования (СТН), на примере города Перми¹ представлены в табл. Город состоит из 7 административных районов (рис.1). Согласно оперативным данным Росстата от 26.04.2021 «Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2021 года», общее количество жителей составляет 1 045 988 человек; распределение населения по районам города представлено на рис. 2.

¹ Генеральный план города Перми. Утверждён решением Пермской городской Думы от 17.12.2010 №205 (в ред. решения Пермской городской Думы от 30.08.2011 №175, решения Пермской городской Думы от 28.01.2014 № 2, решения Пермской городской Думы от 28.01.2014 № 3).



Рис. 1. Административно-территориальное устройство Перми (<https://ru.m.wikipedia.org/>)
Fig.1. Administrative-territorial structure of Perm (<https://ru.m.wikipedia.org/>)

По функциональному значению 49,7% территории города предусматривает размещение и развитие производственной инфраструктуры.

Таблица

Функциональное зонирование городской территории г. Перми

Функциональные зоны жилой и иной застройки	Площадь зоны, Га	Процентное отношение к общей площади, %	Максимальная плотность жилой застройки, ж.е.*/Га	Годовой расход газа для бытовых целей, млн.м ³ /год
1. Зоны жилой и иной застройки, в том числе:	10 808	50,3		70,7
1.1. зона ядра городского центра – СТН-А	191	0,9	150	1,7
1.2. зона городского центра – СТН-Б	713	3,3	160	9,0
1.3. зона многофункциональной застройки срединной части города – СТН-В	1 278	6,0	125	18,0
1.4. зона многофункциональной жилой застройки – СТН-Г	1 257	5,9	100	18,4
1.5. зона жилой застройки – СТН-Д	880,4	4,1	50	5,3
1.6. зона удаленных городских центров – СТН-Е	1 475	6,9	70	13,0
1.7. зона средне- и малоэтажной застройки – СТН-Ж	2 146	10,0	20	3,5
1.8. зона малоэтажной застройки – СТН-И	2 896	13,5	15	1,8
2. Зоны производственного назначения, в том числе:	10 666	49,7	-	-
2.1. зона производственно-коммунальная – ТСП-П	2 456	11,4	-	-
2.2. зона промышленно-торговая – ТСП-ПТ	8 210	38,2	-	-

* ж.е. (жилая единица) – отдельная квартира или индивидуальный жилой дом

Характер распределения природного газа по районам неравномерный. Так как

город расположен на левом и правом берегу реки Кама требуется решение вопроса резервирования источников газоснабжения. Свердловский, Орджоникидзевский, Кировский, Индустриальный, Дзержинский районы имеют возможность подключения к системе газоснабжения от магистральных газопроводов. Наличие на территории газораспределительных сетей высокого, среднего и низкого давления в рассмотренных районах призвано обеспечить надежное обеспечение потребителей газа. Развитие многоступенчатых систем в городах с высоким уровнем дифференциации территории по функциональному принципу является экономически обоснованным. Проложенные на территории города сети газораспределения более чем на 90 % выполнены из металлических газопроводов. Ввиду того, что срок службы стальных газопроводов составляет 40 лет, система должна в ближайшие 30–40 лет полностью модернизирована с учетом новых материалов и перспективных потребителей [18–20]. В условиях планирования на долгосрочный период необходимо увязывать прогнозы развития территорий с развитием структуры систем газоснабжения. Данные задачи решаются на основе цифровых технологий с целью повышения надежности, технологичности и экономической эффективности газоснабжения [21, 22].

Строительство газопроводов осуществляется с учетом рельефа местности, геолого-гидрологических условий, существующих естественных и искусственных преград. В процессе подготовительных и строительных работ, решаются вопросы землепользования и отвода земли под участки строительства систем газораспределения. В качестве источника природного газа для газораспределительных систем территорий является магистральный газопровод, или станция приема хранения и регазификации (СПХР). В регионах с развитой газотранспортной системой в непосредственной близости от магистральных газопроводов наиболее широко применяется структура газораспределения от газораспределительных станций, системы газораспределительных сетей и пунктов редуцирования газа. Использование сжиженного природного газа (СПГ) возможно при отсутствии магистральных газопроводов в непосредственной близости от объектов использования газа и при этом предусматривается создание системы сжижения и транспортировки СПГ автомобильным, железнодорожным и водным транспортом.

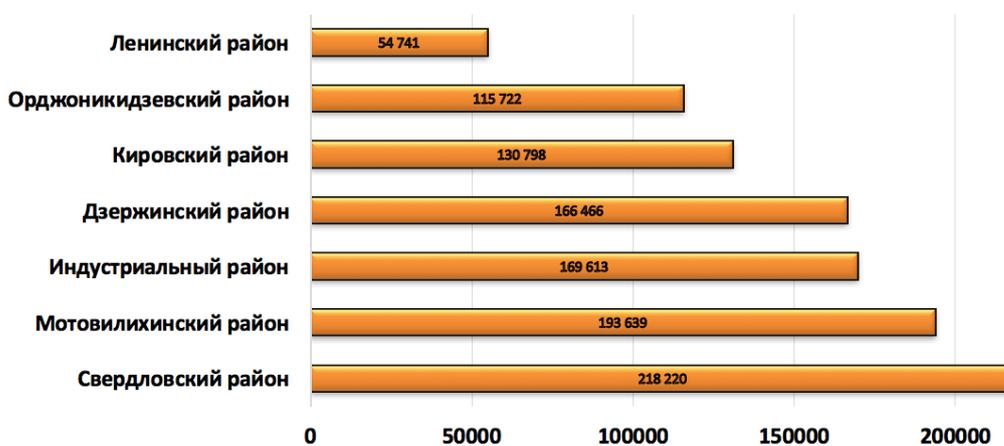


Рис. 2. Численность населения в районах Перми (иллюстрация авторов)

Fig.2. The population in the areas of Perm (illustration by the authors)

Пространственная модель потребления газа для территории имеет практическое значение [2]. При планировании развития энергосистем города, для отдельных зон города учитываются данные годового и часового расхода газа. Фактическое потребление газа на основе статистических данных отражает структуру потребления энергоресурсов для экономических и климатических условий достаточно ограниченного временного периода. В перспективном анализе потребление газа определяется на основе нормативных методик расчета. Методики определения годовых и расчетных часовых расходов газа при перспективном планировании рекомендуется осуществлять на базе стандартных удельных нормативных значений. Данная методика использовалась при планировании систем газоснабжения в советский период и показала устойчивость и эластичность при

значительных экономических и социальных изменениях в обществе. Необходимо отметить, что удельные нормативы для проектирования и планирования развития территорий не совпадают с понятием текущих нормативов потребления газа для расчета с потребителями. Удельные нормативы для расчета с потребителями изменяются в соответствии с особенностями потребления на территории и могут утверждаться на краткосрочный период; тогда как в долгосрочной перспективе учитывается неопределенный характер газопотребления на 50 лет.

Прогнозируемый расход газа определяется на основе планирования развития территорий города и производится в соответствии со стандартными удельными нормативами потребления газа. Как фактическое потребление по данным статистики, так и планируемое является необходимым для экономического обоснования источника газоснабжения. Сбор и анализ информации о годовом объеме потребления газа для всех сфер деятельности на данной территории в соответствии со статистическими данными позволяет выявить неравномерность потребления.

Годовой объем газа для потребителей на территории распределяется по таким группам потребителей, как бытовое, промышленное потребление, теплоснабжение:

$$V_{\text{общ}} = \sum V_{\text{пр}} + \sum V_{\text{тс}} + \sum V_{\text{х}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общий расход газа, м³/год; $V_{\text{пр}}$ – годовое потребление промышленными предприятиями, м³/год; $V_{\text{тс}}$ – пользование газа на теплоснабжение, м³/год; $V_{\text{х}}$ – хозяйственно-бытовое потребление газа, м³/год.

Для жилых зон в исследовании рассматриваются следующие направления использования газа: для отопления и вентиляции, горячего водоснабжения, приготовления пищи. При проектировании и разработке схем газоснабжения определяется максимальный часовой расход, который зависит от неравномерности потребления:

$$V_m^h = V_m^y \cdot K_m, \quad (2)$$

где V_m^y – максимальный часовой расход газа для категории потребителей м³/ч; K_m – коэффициент часового максимума, определяется для каждой категории по нормативной литературе.

Поскольку нагрузка на горячее водоснабжение учтена при расчете нагрузки на теплоснабжение, тогда по удельным нормативам при определении хозяйственно-бытового расхода учитывается только расход газа для приготовления пищи. Диаметры кольцевых газораспределительных сетей среднего давления определены с учетом транспортного резерва для увеличения пропускной способности сети в аварийной ситуации. Аварийная ситуация для рассмотренной сети характеризуется выходом из строя одного из головных газорегуляторных пунктов. В случае аварии на одном из газорегуляторных пунктов возможно изменение направления потока газа в кольцевой сети; происходит перераспределение потока газа, при отключении аварийного участка. При аварийном режиме у абонентов обеспечивается заданное давление при расходе газа, который рассчитывается с учетом коэффициента обеспеченности для аварийной ситуации. Критерием сравнения вариантов газораспределительной системы является материальная характеристика сети:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n (d_i \cdot l_i), \quad (3)$$

где M – материальная характеристика газораспределительной сети, (м·мм); d_i – диаметр участка сети газоснабжения, мм; l_i – длина участка сети газоснабжения, м.

Модель распределительной газовой сети предназначена для обеспечения потребителей газом с заданными параметрами как при нормальной эксплуатации, так и в режиме аварийных ситуаций.

3. Результаты и обсуждение

Данные функционального зонирования (табл.) показывают, что процентная доля площади производственных и промышленных, коммунальных и торговых зон составляет 46,8%. Развитие производственных, коммунальных и промышленно-торговых зон предусматривает перспективное использование природного газа для производства, теплоснабжения и выработки электроэнергии. Для разных районов города Перми функциональное территориальное зонирование имеет дифференцированный характер.

Аналогичный подход при разработке математической модели используется в ряде работ при исследовании данных для населенных объектов [2, 14, 15, 22]. Отличительной особенностью является направленный характер обеспечения управляемости и стабильной работы единой газораспределительной системы, как каждого района, так и всего города в целом с целью теплоснабжения.

Для промышленных районов газораспределительные сети высокого и среднего давления являются основой надежного газоснабжения. Расположение промышленных зон и объемы потребления газа определяют многоступенчатую структуру газораспределительной сети. Для жилых зон газоснабжение имеет социальное и экономическое значение. Исследования вариантов сети газораспределения низкого давления, представленные в работе [10], обеспечивают селитебную зону малоэтажной застройки. Газораспределительная система среднего давления с возможностью подключения потребителей зоны жилой застройки имеет экономические преимущества [9]. Рассмотренный вариант обеспечивает поэтапное развитие многоступенчатой инфраструктуры системы газораспределения. В исследовании авторов [10] подход к развитию сети низкого давления является одним из возможных вариантов развития многоступенчатой газораспределительной сети крупного объекта. Нагрузка на теплоснабжение для условий города Перми превышает нагрузку на бытовые нужды (рис. 3). В жилых районах города имеются системы газопроводов низкого давления, которые обеспечивают в основном бытовое потребление. Зоны малоэтажной и среднеэтажной застройки по объему потребления газа не превышают 5,3% от общего объема на бытовые нужды.

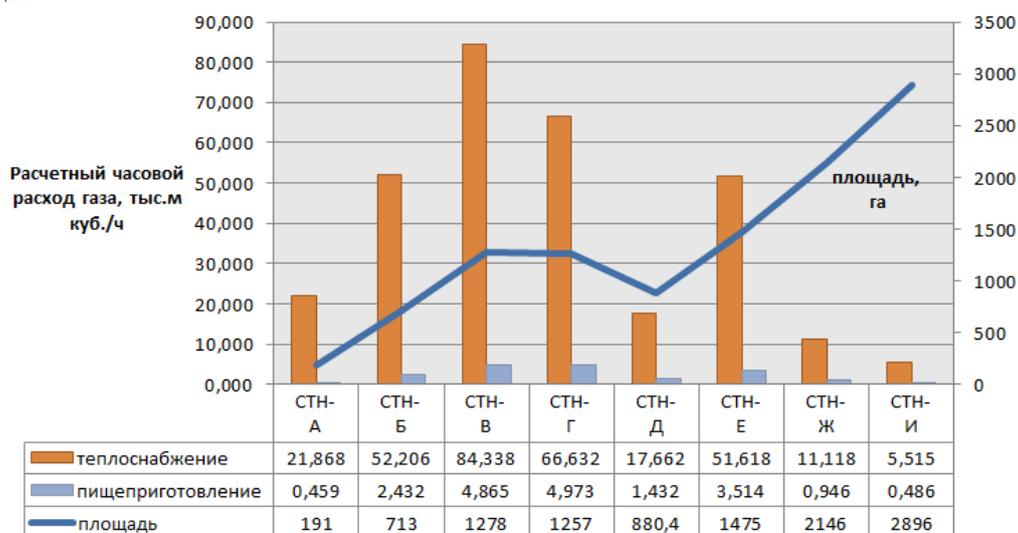


Рис.3. Расчетный часовой расход газа для теплоснабжения и приготовления пищи для функциональных зон города (иллюстрация авторов)

Fig.3. Gas volume for heat supply and cooking by standardized areas per hour (illustration by the authors)

Для зоны застройки средней части города СТН-В, многофункциональной жилой зоны СТН-Д, зоны отдаленных городских центров СТН-Е существующие газораспределительные системы низкого давления требуют реконструкции, чтобы иметь возможность подключать потребителей для обеспечения перспективной нагрузки на отопление и вентиляцию (рис. 4).

Выбор решений по энергообеспечению для различных объектов может выполняться с учетом планировочной структуры сети и стоимостных критериев [14]. Для площади 338 га с плотностью населения от 100 до 350 человек на гектар рассматриваются варианты газораспределительных сетей среднего давления. Комбинированная газораспределительная сеть с кольцевыми и тупиковыми участками обеспечивает потребление газа для теплоснабжения и приготовления пищи. Выбор расположения газорегуляторных пунктов, которые являются источниками газораспределительной сети, оказывает влияние на материальную характеристику. Для

сети предусматривалось 2 либо 3 головных газорегуляторных пункта для обеспечения подачи газа в аварийных режимах работы при отказе одного из источников. Уменьшение общей суммы длин участков для вариантов схемы газораспределительной сети среднего давления приводит к снижению материальной характеристики. При плотности населения от 100 до 200 человек на гектар для рассмотренной планировки материальная характеристика изменяется в основном от протяженности сети. Материальные характеристики разработанных вариантов увеличиваются на 24 %, при этом количество потребителей увеличивается в 3,5 раза. Тенденция к уменьшению материальной характеристики, для количества жителей 67 724 человек и 118 517 человек, связана с увеличением количества газорегуляторных пунктов до 3 штук. В остальных вариантах в сети газоснабжения предусмотрены по 2 газорегуляторных пункта.

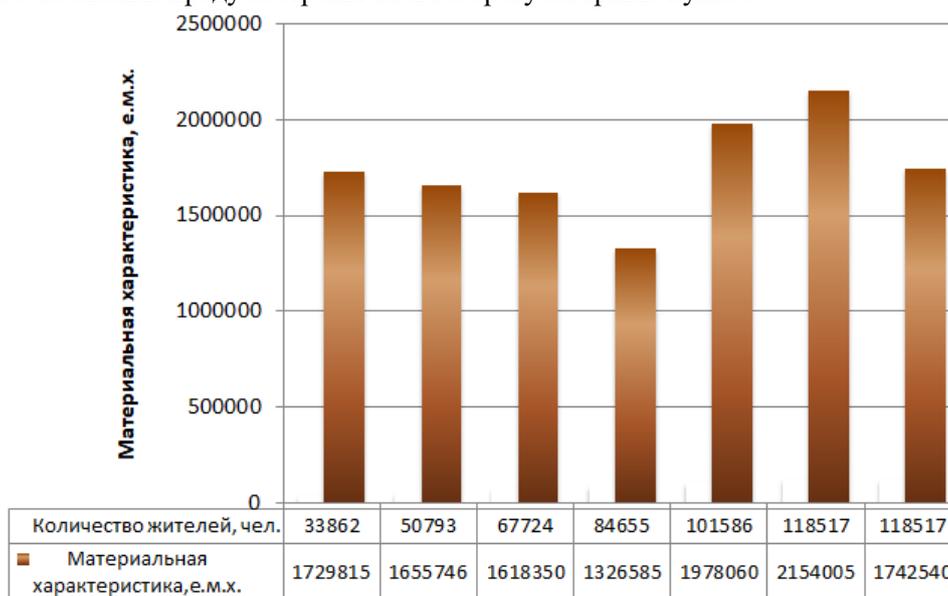


Рис.4. Зависимость материальной характеристики газораспределительной сети среднего давления от плотности населения территории (иллюстрация авторов)

Fig.4. Dependence of the material characteristics of the medium pressure gas distribution network on the population density of the territory (illustration by the authors)

Использование газа для теплоснабжения значительно увеличивает расходы в сети. Увеличение расхода газа с ростом количества потребителей и повышением комфортности жилья в индивидуальной жилой застройке следует учитывать при реконструкции и модернизации существующих сетей. В рассмотренном варианте при планировании развития систем газораспределения рассчитана ступень среднего давления. К участкам сети среднего давления присоединяются потребители зоны жилой застройки посредством газопроводов среднего либо низкого давления, после предварительного снижения давления газа в газорегуляторных пунктах. Также установка газорегуляторных пунктов возможна в непосредственной близости у потребителя. Использование регуляторов давления у потребителей технологически обеспечивает стабильность давления при изменении расхода газа. Предложенная модель расчета сети с распределенной нагрузкой газовой сети позволяет реализовать как сети среднего давления, так и сети низкого давления в жилых районах.

В результате планирования на основе рассмотренной модели обеспечивается поэтапный принцип ввода участков сети, как при строительстве, так и при эксплуатации в долгосрочном периоде прогнозирования. Частично это сглаживает отставание в готовности потребителей к приему газа. То обстоятельство, что неготовность абонентов к приему приводит к тому, что построенные газопроводы долгое время не загружаются на проектную мощность, несколько снижает экономическую эффективность системы газораспределения. Уменьшение нагрузки от проектных значений может отражаться на процессе регулирования давления газа. Но с учетом технологических особенностей работы газорегуляторных пунктов в широких диапазонах расходов и при расчетных значениях коэффициента загрузки от 10 до 80 % обеспечивается стабильная работа

системы газоснабжения. Поскольку газораспределительные сети из полиэтилена служат 50 лет, существует объективная неопределенность в отношении подключения оборудования потребителей. Срок службы газоиспользующего оборудования обычно составляет от 10 до 15 лет. Поэтому система газораспределения, на основе многоступенчатой структуры предусматривает планирование ступени среднего и высокого давления с учетом долгосрочной перспективы изменений в потреблении, связанного с развитием территории, заменой оборудования. Для эффективного решения этих вопросов необходимы организационные и технологические решения для совместной работы организаций ПАО «Газпром» и администраций субъектов Российской Федерации, направленные на синхронное создание газопроводно-потребительского комплекса и загрузку построенных объектов с момента ввода в эксплуатацию. Для решения вопроса экономической эффективности необходимо не только обеспечивать наличие систем газораспределения и газопотребления, но и наличие платежеспособного спроса со стороны потребителей, что объективно связано со стабильной и предсказуемой тарифной политикой. Для рассмотренного объекта суммарная площадь зон СТН-Б, СТН-В, СТН-Г, СТН-Е составляет 43,6% от площади зон селитебного назначения. При этом суммарное расчетное часовое значение потребления газа для данных зон от общего потребления на теплоснабжение и пищеприготовление составляет 82%.

Во время эксплуатации, предложенная модель обеспечивает возможность мониторинга работы сети в новых условиях, при подключении вновь вводимой нагрузки. Математическое моделирование системы газоснабжения предусматривает проверку принятых решений после их реализации в процессе подключения абонентов и при эксплуатации сети с помощью замеров давления в источнике и на абонентских ответвлениях.

4. Заключение

Расчет газораспределительной сети с учетом нагрузки для теплоснабжения осуществляется на основе модели распределенной нагрузки расхода газа. Данная расчетная модель позволяет обеспечить экономическую эффективность проектов газоснабжения в условиях поэтапного ввода в эксплуатацию участков сети по мере развития территорий, в том числе при модернизации и реконструкции.

При реконструкции газораспределительные системы в зоне жилой и иной застройки с плотностью населения более 100 жителей на гектар, для отопительного периода более 200 дней и расчетной температурой отопления менее -30°C рекомендуется проектировать с учетом нагрузки на теплоснабжение для ступени среднего и высокого давления газа. Многоступенчатая структура системы газораспределения обеспечивает надежное и экономичное газоснабжение территории.

На основе плана долгосрочного развития г. Перми с учетом плотности застройки, климатических условий выполнен расчет годовых и расчетных часовых объемов потребления газа в селитебной зоне. Для участка с заданной площадью произведен анализ структуры газораспределительной сети при изменении плотности застройки от 100 до 350 человек на гектар. Выявлена возможность энергообеспечения потребителей для целей теплоснабжения и хозяйственно-бытовых нужд, подключенных к системе газоснабжения, за счет структурных решений.

Список литературы/ References

1. Фортов В. Е. Вступительное слово председателя совета по приоритету академика РАН В. Е. Фортова // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 4. С. 318-320. [Fortov V. E. Introductory speech of the Chairman of the Council on priority of Academician of the Russian Academy of Sciences V. E. Fortov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019. Iss. 89 (4). P.318-320.] DOI: 10.31857/S0869-5873894318-320.
2. Бугаева Т. М., Новикова О. В. Современные методы планирования энергосистемы города // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 4. С. 377-387. [Bugueva T. M. Modern methods of planning the city's power system // Energy. Bulletin of higher institutions and energy associations of the CIS. 2019. Iss. 62(4). P. 377-387.] DOI: 10.21122/1029-7448-2019-

- 62-4-377-387.
3. Gudmestad O. T., Traa K. Sustainable use and production of energy in the 21st century // *International Journal of Energy Production and Management*. 2016. Vol. 1, Iss.1. P. 1-15. DOI: 10.2495/EQ-V1-N1-1-15.
 4. Шилкина С. В. Экономика развития электроэнергетики на возобновляемых источниках энергии в России с учетом мировых тенденций // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 3(68). С. 137-146. [Shilkina S. V. Economics of development of electric power industry on renewable energy sources in Russia taking into account world trends // *Bulletin of Civil Engineers*. Iss. 3(68). P.137-146.] DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-137-146.
 5. Клинова М. В. Государство и энергетическая безопасность в мире и Европе как общественное благо // *Вопросы экономики*. 2022. № 6. С. 110-125. [Klinova M. V. State and energy security in the world and Europe as a public good // *Economic issues*. 2022. Iss. 6. P. 110-125.] DOI: 10.32609/0042-8736-2022-6-110-125.
 6. Мингалеева Р. Д., Бессель В. В. Устойчивое развитие крупнейших экономик мира требует все больше энергии // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2022. № 3(207). С. 57-63. [Mingaleeva R. D., Bessel V. V. Sustainable development of the world's largest economies requires more and more energy // *Problems of economics and management of the oil and gas complex*. 2022. Iss. 3(207). P. 57-63.] DOI: 10.33285.
 7. Silver, L. Y. Conversion of heating equipment to firing by natural gas // *Glass and Ceramics*. 1960. Vol. 15, Iss. 5. P. 271-273. DOI: 10.1007/BF00667506.
 8. Liang J., Guo K., Huangfu L. Prediction method of city natural gas monthly consumption // *Huagong Xuebao*. 2015. Vol. 66. P. 392-398. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20150742
 9. Барышева, О. Б., Хабибуллин Ю. Х. Энергоресурсосбережение в системе газоснабжения // *Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве : материалы I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра техн. наук, профессора, А. А. Сандера, Новосибирск, 16–18 ноября 2016 года. – Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников "Сибирская академическая книга", 2017. С. 21-27. [Barysheva, O. B., Khabibullin Yu. Kh. Energy resource saving in the gas supply system // *Energy saving and energy efficiency in industrial enterprises and in housing and communal services: materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference, dedicated to the memory of Dr. Tech. Sciences, Professor, A. A. Sander, Novosibirsk, November 16–18, 2016. – Novosibirsk: Association of Scientific Employees "Siberian Academic Book", 2017. P. 21-27.]**
 10. Медведева О. Н., Бессонова Н. С. Сравнительная оценка энергоэкономической эффективности поселковых систем газоснабжения // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2017. № 3(47). С. 21-31. [Medvedeva O. N., Bessonova N. S. Comparative assessment of the energy-economic efficiency of settlement gas supply systems // *Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2017. Iss.3(47). P.21-31.]
 11. Бобылева Т. А., Хрипунова А. С. Исследование проблемных вопросов газификации России и способов их решения // *Вестник университета*. 2016. № 7-8. С. 12-18. [Bobyleva T. A., Khripunova A. S. Investigation of problematic issues of Russian gasification and ways to solve them // *Bulletin of the University*. 2016. Iss. 7-8, P.12-18.]
 12. Sarchenko V.I., Khirevich S.A. Integrated and Sustainable Territorial Development as an Efficient Tool for Urban Renewal // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island, 10–12.12.2019. Vol. 459, 5, Chapter 4. Russky Island: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 052028. DOI: 10.1088/1755-1315/459/5/052028.*
 13. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Adam L.A. Gitelman, L. D. Sustainable Energy for

- Smart City // International Journal of Energy Production and Management. 2019. Vol. 4. Iss. 4. P. 343-353. DOI: 10.2495/EQ-V4-N4-343-353.
14. Mel'kumov V. N., Chujkin S. V., Papshickij A. M., Sklyarov K. A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2015. Iss.4(28). P.33-40.
 15. Соловьева Е. Б., Лученинова Д. А., Федорова Т. А. Выбор оптимальной системы газораспределения // Аграрный научный журнал. 2018. № 4. С. 59-62. [Solovyova E. B., Lucheninova D. A., Fedorova T. A. Choosing the optimal gas distribution system // Agrarian Scientific Journal. 2018. Iss. 4. P. 59-62.] DOI: 10.28983/asj.v0i4.452.
 16. Chen F., Wu C. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // Frontiers in Energy. 2020. Vol. 14, Iss. 2. P. 213-223. DOI: 10.1007/s11708-020-0672-5.
 17. Akhmadiev, F. G., Gizzyatov R. F. Computer Simulation of the Heat Transfer Process through Multilayer Building Envelopes // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. Vol. 42. Iss. 9. P. 2089-2094. DOI: 10.1134/S1995080221090043.
 18. Казанцева Н. К., Ткачук Г. А., Алексева Е. В. и др. Состояние базы национальных стандартов на композитные материалы // Стандарты и качество. 2017. № 10. С. 48-51 [Kazantseva N. K., Tkachuk G. A., Alekseeva E. V., Tarasova Yu. O. The state of the base of national standards for composite materials // Standards and quality. 2017. Iss. 10. P.48-51.]
 19. Иванцов О. М., Бушова Н. Н. Научно-техническая программа «Высоконадежный трубопроводный транспорт» // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С. 12-21. [Ivantsov O. M., Bushova N. N. Scientific and technical program «Highly reliable pipeline transport» // Occupational safety in industry. 2019. Iss. 3. P. 12-21.] DOI: 10.24000/0409-2961-2019-3-12-21.
 20. Группа ПОЛИПЛАСТИК – лидер инноваций в сфере полимерных трубопроводных систем // Газовая промышленность. 2022. № 9(837). С. 90-91 [POLYPLASTIC – Group is the leader of innovations in the field of polymer pipeline systems // Gas Industry. 2022. Iss. 9(837). P. 90-91.]
 21. Белоглазова Т. Н., Романова Т. Н. Эффективное внедрение цифровых технологий в сфере газоснабжения // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 1(53). С. 141-151. [Beloglazova T. N., Romanova T. N. Effective introduction of digital technologies in the field of gas supply // Problems of regional energy. 2022. Iss. 1(53). P. 141-151.] DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.11.
 22. Sukharev M. G., Kosova K. O., Popov R. V. Mathematical and computer models for identification and optimal control of large-scale gas supply systems // Energy. 2019. Iss. 184. P. 113-122. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.131.

Информация об авторах

Белоглазова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация
E-mail: tabeloglazova@yandex.ru

Романова Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация
E-mail: botinkin@yandex.ru

Information about the authors

Tatiana N. Beloglazova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
E-mail: tabeloglazova@yandex.ru

Tatiana N. Romanova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
E-mail: botinkin@yandex.ru



Анализ качества воды хозяйственно-питьевого назначения в г. Казань за 2021-2022 год

С.Н. Медведева¹, А.Ю. Власова¹, Р.Р. Вилданов¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Развитие и увеличение мощностей промышленности, в том числе и предприятий топливно-энергетического комплекса приводит к существенному росту потребления пресной воды. На примере тепловых электрических станций, увеличение мощности производства влечет за собой рост потребности в обессоленной воде, которая используется в качестве рабочего тела, значит увеличивается производительность водоподготовительных установок. Любое производство связано с потреблением воды, что приводит к истощению ресурсов и существенному сокращению количества источников воды, пригодной для хозяйственно-питьевых нужд. Кроме того, предприятия сбрасывают сточные воды в водоемы, что приводит к загрязнению водной аквакультуры. Учитывая, что технологии очистки воды для хозяйственно-питьевого назначения разрабатывались еще в середине прошлого века, то на сегодняшний день данные установки морально устарели. Все чаще потребители жалуются на несоответствие качества хозяйственно-питьевой воды нормативам по органолептическим показателям (запах, вкус, привкус). Поэтому цель данной работы заключается в проведении анализа качества воды хозяйственно-питьевого назначения по выборочным параметрам в разрезе районов города Казань по сезонам за 2021-2022 годы. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: изучение систем водоснабжения г. Казань; проведение лабораторных исследований по отдельным районам города за 2021-2022 годы и анализ усреднённых показателей качества питьевой воды. Для проведения анализа были использованы следующие методы: титриметрические, турбидиметрические и потенциометрические. На основе полученных результатов были предложены мероприятия по повышению качества воды хозяйственно-питьевого назначения.

Результаты. Лабораторные исследования были направлены на определение следующие показатели: общее солесодержание, удельная электропроводимость, водородный показатель, общая жёсткость, перманганатная окисляемость, щёлочность, содержание хлоридов, ионов аммония, общего железа (III), сульфат-ионов. Выбор определения именно этих показателей был сделан с учетом жалоб потребителей и их возможных причин, а также приборной базой лаборатории университета. Такие показатели как общее солесодержание, удельная электропроводность, щелочность, жесткость, содержание сульфат-ионов характеризует качественный и количественный состав отложений на внутренней поверхности трубопроводов. Водородный показатель, общее железо (III), содержание хлоридов характеризуют коррозионную агрессивность (вода хозяйственно-питьевого назначения может иметь неприятный запах и привкус, а также повышенную цветность). Перманганатная окисляемость и содержание ионов аммония определялись с целью определения органических соединений и причиной их появления. Превышение ионов аммония свидетельствуют о наличии попадания канализационных сточных вод. В ходе экспериментов было выявлено, что некоторые показатели находятся на граничных условиях предельно допустимых концентраций, что может негативно влиять на жизнедеятельность населения, использующего эту воду. Для решения данной проблемы были даны рекомендации по снижению негативного фактора.

Выводы. На основании полученных результатов были предложены мероприятия для отрасли водоснабжения, которые заключались во внедрении программ по модернизации, строительству и реконструкции объектов централизованных систем водоснабжения для

повышения надёжности работы, обеспечении благоприятной экологической и эпидемиологической ситуации, снижения затрат на эксплуатацию и ремонт комплекса, подключения пригородов Казани к централизованному водоснабжению и водоотведению, а также создании резерва мощности и заменены изношенных сетей с увеличением диаметра для увеличения пропускной способности системы.

Ключевые слова: хозяйственно-питьевая вода, качество, водоснабжение, очистка, предельно допустимая концентрация, мониторинг, анализ, примеси

Для цитирования: Медведева С.Н., Власова А.Ю., Вилданов Р.Р. Анализ качества воды хозяйственно-питьевого назначения в г. Казань за 2021-2022 год // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 157-167, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.16, EDN: WUGLVA

Analysis of the quality of drinking water in Kazan in the period of 2021-2022

S.N. Medvedeva¹, A.Yu. Vlasova¹, R.R. Vildanov¹

¹Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The development and increase in the capacity of industry, including enterprises of the fuel and energy complex, leads to a significant increase in the consumption of fresh water. Using the example of thermal power plants, an increase in production capacity entails the increase in the need for desalinated water, which is used as a working fluid, which means that the productivity of water treatment plants increases. Any production is associated with water consumption, which leads to depletion of resources and a significant reduction in the number of sources of water suitable for household and drinking needs. In addition, enterprises discharge waste water into reservoirs, which leads to pollution of aquaculture. Considering that water purification technologies for household and drinking purposes were developed in the middle of the last century, today these installations are obsolete. Increasingly, consumers complain about the inconsistency of the quality of household drinking water with the standards for organoleptic indicators (smell, taste, aftertaste). Therefore, the purpose of this work is to analyze the water quality of household and drinking water supply by sample parameters in the context of the districts of the city of Kazan by season in the period of 2021-2022. To achieve this goal, the following tasks were set: studying the water supply systems of Kazan; conducting laboratory studies in certain districts of the city in the period of 2021-2022 and analyzing average indicators of drinking water quality. The following methods were used for the analysis: titrimetric, turbidimetric and potentiometric. Based on the results obtained, measures were proposed to improve the quality of water for household and drinking purposes.

Results. Laboratory studies were aimed at determining the following indicators: total salinity, electrical conductivity, hydrogen index, total hardness, permanganate oxidability, alkalinity, content of chlorides, ammonium ions, total iron (III), sulfate ions. The choice of determining exactly these indicators was made considering consumer complaints and their possible causes, as well as the instrument base of the university laboratory. Indicators such as total salinity, specific electrical conductivity, alkalinity, hardness, and sulfate ion content characterize the qualitative and quantitative composition of deposits on the inner surface of pipelines. The hydrogen index, total iron (III), and chloride content are characterized for corrosion aggressiveness (drinking water may have an unpleasant odor and taste, as well as have an increased color). Permanganate oxidizability and the content of ammonium ions were determined in order to determine organic compounds and the cause of their appearance. Excess of ammonium ions indicate the presence of ingress of sewage. During the experiments, it was found out that some indicators are at the boundary conditions of the maximum permissible concentrations, which can negatively affect the livelihoods of the population using this water. To solve this problem, recommendations were given to reduce the negative factor.

Conclusions. Based on the results obtained, measures were proposed for the water supply industry, which consisted in the implementation of programs for the modernization, construction and reconstruction of centralized water supply facilities to improve the reliability of operation, ensure a favorable environmental and epidemiological situation, reduce the cost of operation and repair of the complex, connect the suburbs of Kazan to centralized water supply and sanitation, as well as creating a reserve capacity and replaced worn-out networks with an increase in diameter to increase the system capacity.

Keywords: household drinking water, quality, water supply, purification, maximum permissible concentration, monitoring, analysis, impurities

For citation: Medvedeva S.N., Vlasova A.Yu., Vildanov R.R. Analysis of the quality of drinking water in Kazan in the period of 2021-2022 // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 157-167, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.16, EDN: WUGLVA

1. Введение

Системы водоснабжения и водоотведения играют ключевую роль в жилищной инфраструктуре, обеспечивая комфортную жизнь и устойчивое развитие городского хозяйства. На данный момент они являются неотъемлемой частью жизненного цикла, предоставляя возможность удовлетворять основные потребности водных ресурсов жителей. Однако с ростом населения и увеличением нагрузки на системы водоснабжения и водоотведения, возникают серьезные трудности с нехваткой пресной воды и выведением сточных вод. Для решения этих проблем требуется разработка новых, более эффективных методов проектирования и строительства систем водоснабжения и водоотведения, а также повышение качества технического обслуживания и своевременного контроля систем с помощью автоматических датчиков. В долгосрочной перспективе управление данными системами должно стать более инновационным и устойчивым, с использованием новых технологий и инженерных решений, которые могут обеспечить оптимально отлаженную работу, и способствовать экономии водных ресурсов с уменьшением степени их загрязнения.

Вода – неотъемлемая часть хозяйственно-бытовой жизни современного человечества. Этот природный ресурс необходим для поддержания жизнедеятельности растений, человека, организации производственного цикла и ресурсоснабжения предприятий, поэтому ее качество и количество оказывают непосредственное влияние на существование всего живого. В работе [1] отмечается уровень корреляции между надежностью системы водоснабжения и величиной содержания отдельных минеральных компонентов в питьевой воде. Авторы [2] выделяют большой спектр влияния нефтяной, транспортной, полиметаллической и строительной сфер жизни на качество окружающей среды и здоровье населения Республики Татарстан.

Большое значение в загрязнении окружающей среды, в том числе и водной аквакультуры, имеет антропогенный фактор, представляющий собой сброс сточных вод промышленных предприятий с недостаточной степенью очистки. Все описанные мероприятия в свою очередь, приводят к истощению ресурсов и существенному сокращению количества источников воды, пригодной для хозяйственно-питьевых нужд. Об этом свидетельствуют исследования [3, 4]. Масштабирование производства формирует потребительское отношение к ресурсам и вскоре может привести к их нехватке и истощению. В публикации [5] отмечается угрожающий характер нехватки водных ресурсов, в частности, в густонаселенных районах, крупных промышленных центрах и орошаемых землях. Практически для всех промышленных предприятий, сельскохозяйственных, гражданских жилых и административных зданий необходима вода, поэтому главная деятельность при водоснабжении – проведение тщательного анализа и контроль за качеством хозяйственно-питьевой воды на соответствие нормам предельно допустимых концентраций примесей.

Качество оказываемых коммунальных услуг имеет первостепенное значение, поэтому при реализации водоснабжения и водоотведения необходима очистка воды от примесей до соответствия нормам предельно допустимых концентраций,

регламентируемых «Санитарно - эпидемиологическими нормативами и правилами». Природную воду могут загрязнять:

- химические примеси – гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды, азотсодержащие компоненты;
- биологические вещества – микроорганизмы, бактерии, органические соединения;
- взвешенные твёрдые частицы – ржавчина, глина, песок, ил;
- тяжелые металлы, железо, марганец;
- газы [6].

Именно поэтому мониторинг воды для хозяйственно-питьевых целей является основополагающим этапом водоснабжения: своевременный контроль и диагностика проб воды хозяйственно-питьевого назначения позволяет на ранних сроках выявлять отклонения и предотвращать критические ситуации. Данная тематика весьма актуальна, поэтому есть работы, в которых были определены основные причины загрязнения. В г. Астрахань было выявлено, что низкое качество водопроводной воды связано с большим количеством сброса бытовых отходов, устаревшими водопроводными коммуникациями и низким уровнем очистки сточных вод [7]. На территории Свердловской области загрязнение большого количества водоёмов произошло благодаря техногенному фактору – в воде было определено большое количество тяжелых металлов [8]. Изменение условий водозабора рек Перми необходимо из-за разницы минерализаций годовой изменчивости уровня воды [9], а также поступление питательных веществ из урбанизированного ландшафта [10].

Поэтому эти воды исследовались гравиметрическим методом [11], дополнительно очищались до питьевого качества с помощью фильтрационных установок [12-14], нанофильтрационных мембран на основе целлюлозы [15] и активированных цеолитов [16].

Основная цель исследования заключалась в проведении анализа качества воды хозяйственно-питьевого назначения по выборочным параметрам в разрезе районов города Казань по сезонам за 2021-2022 годы: Кировский, Авиастроительный, Горки, Ново-Савиновский, Московский и Приволжский. Своевременный мониторинг позволяет выявить проблему и моментально отреагировать на существенные отклонения от нормативных показателей.

Задачами исследования являются:

- изучение систем водоснабжения г. Казань,
- проведение лабораторных исследований по отдельным районам города за 2021-2022 годы и анализ усреднённых показателей качества,
- предложение проведения мероприятий по повышению качества хозяйственно-питьевой воды.

2. Материалы и методы

Водопровод Казани на 84% питает поверхностный водозабор «Волжский», состоящий из реки Волги и Куйбышевского водохранилища. Подземные источники водоснабжения из 10 отдельно стоящих артезианских скважин составляют 16%, поэтому хозяйственно-питьевое водоснабжение города относится к смешанному типу питания. План расположения Волжского водозабора г. Казани с границами санитарной зоны представлен на рисунке 1. В состав его сооружений входят насосные станции 1-го и 2-го подъёмов, оборудования водоочистки, состоящие из смесителей, камер хлопьеобразования, фильтров, отстойников и резервуаров чистой воды со 100% запасом. Протяженность водоводов городской сети составляет 1695,9 км, они включают в себя 176 насосных станций и 30 резервуаров чистой воды. Проектная производительность насосной станции 1-го подъёма составляет 630 000 м³/сут., очистных сооружений – 510 000 м³/сут. Поэтому в распределительные сети Казани подаётся более 300 000 м³ воды хозяйственно-питьевого назначения в сутки. Суммарная производительность подземных водозаборов, из которых 10 грунтовых и 13 артезианских скважин, составляет 94 960 м³/сут. [17]

Городские водопроводные сети снабжают все территориальные районы города: Авиастроительный, Вахитовский, Кировский, Московский, Ново-Савиновский, Приволжский, Советский. Данные о протяженности водопроводных сетей представлены в таблице 1.

Таблица 1
Протяженность водопроводных сетей по районам города на 2015 г.¹

Район	Общая протяжённость, км	Протяженность ветхих сетей, км	Ветхие сети, %
Авиастроительный	167,90	90,70	56,30
Вахитовский	191,57	112,30	60,50
Ново-Савиновский	142,20	49,20	36,16
Московский	137,45	49,57	37,59
Кировский	266,10	112,80	44,21
Приволжский	306,80	143,55	47,73
Советский	48980	201,30	43,33
ИТОГО	1695,90	759,40	46,58

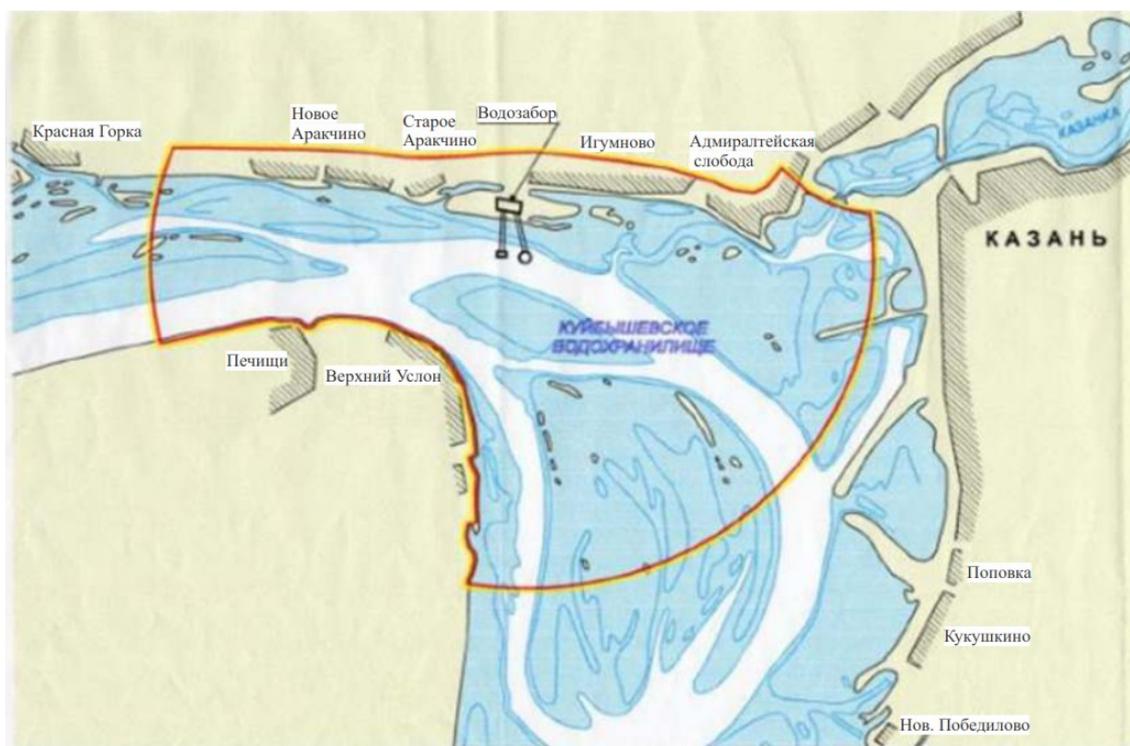


Рис. 1. Ситуационный план расположения водозабора «Волжский» с границами санитарной зоны.¹

Fig. 1. Layout plan for the location of the water intake "Volzhsky" with the boundaries of the sanitary zone.¹

Однако для использования воды в хозяйственно-питьевых целях необходима её тщательная очистка. После вступления в силу СанПиН 1.2.685-21 – «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» были введены дополнительные нормирующие показатели

¹ Постановление Исполнительного комитета г. Казани №4345 от 10.12.2015 «Об утверждении схем водоснабжения и водоотведения в административных границах муниципального образования города Казани на период с 2016 по 2025 год»

определения качества хозяйственно-питьевой воды и регламентирован ряд дополнительных мероприятий по улучшению степени её очистки.²

Технология подготовки исходной воды до соответствия питьевым нормам включает в себя различные методы удаления химических примесей, биологических веществ, газов и твёрдых частиц. К наиболее распространённым способам очистки воды относятся: хлорирование, озонирование, коагуляция, фильтрация, отстаивание, обработка ультрафиолетовым излучением, обратный осмос.

Для очистки воды водозабора «Волжский» применяется схема традиционной технологии, которая базируется на двухступенчатой очистки воды. Среди применяемых методов выделяют: обеззараживание, коагулирование, отстаивание и фильтрование. Первая ступень водоочистки состоит из смесителей, камер хлопьеобразования и горизонтальных отстойников, вторая ступень включает скорые фильтры с загрузкой кварцевым песком. Очистные сооружения основываются на реагентном методе с применением коагулянта и флокулянта. С помощью гипохлорита натрия происходит обеззараживание воды в две ступени.¹

Подготовка природной воды в городе Казань организована с применением двухступенчатой очистки для хозяйственно-питьевых нужд. При этом присутствуют изменения качества исходной воды в паводковый и летний (июль, август) периоды в связи с цветением сине-зелёных водорослей, а также кратковременные эпизодические изменения, связанные с техногенными факторами. Поэтому в данной работе была проведена лабораторные эксперименты по определению показателей качества воды в разрезе районов города.

Пробы воды были отобраны согласно ГОСТР 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору проб». Для целостности картины были взяты пробы водопроводной воды абонентов в разные сезоны на протяжении двух лет. Для проведения лабораторного эксперимента были использованы гостированные методики определения показателей качества водопроводной воды хозяйственно-питьевого назначения из систем централизованного водоснабжения шести районов города Казань по сезонам 2021-2022 годов. С помощью кондуктометра был проведён анализ на общее солесодержание (ОСС), водородный показатель (рН) и удельную электропроводимость (УЭП); титриметрическим методом были определены показатели общей жёсткости, перманганатной окисляемости, содержания хлоридов и щёлочности, а такие компоненты, как азотсодержащие соединения, соединения железа (III) и сульфат-ионы определялись турбидиметрическим методом с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1800. Данный прибор является двухлучевым, с диапазоном длин от 190 до 800 нм. Измерительный блок имеет персональный компьютер, где автоматически происходит преобразование величины поглощения в концентрацию измеряемого компонента. Приборы, участвующие в проведении анализа, имеют сертификаты поверки с действующим сроком.

Общая жёсткость в работе определялась с помощью титрования с использованием хелатирующего агента, такого как комплексонометрия с содержанием динатриевой соли этилендиамина тетрауксусной кислоты (Трилон Б). Для определения данного показателя вода смешивается с хелатообразующим агентом, который реагирует с ионами металлов и образует комплексы, затем добавляется индикатор, меняющий окраску до красно-фиолетового цвета. В процессе титрования и достижения точки эквивалентности раствор приобретает сине-фиолетовый оттенок, это свидетельствует об окончании титрования. Жесткость воды определяется содержанием хелатирующего агента, необходимого для полной миксации всех металлических ионов.

3. Результаты и обсуждение

В результате лабораторных исследований были получены показатели качества хозяйственно-питьевой воды абонентов города Казань за 2021 – 2022 год в разрезе

² СанПиН 1.2.685-21 – «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021

сезонности, усреднённые данные представлены в таблицах ниже (Таблица 2,3). Отбор проб производился произвольно среди потребителей в рамках каждого района.

Таблица 2

Усреднённые показатели железа, сульфатов, азотсодержащих, перманганатной окисляемости, рН, общего солесодержания, удельной электропроводимости за 2021/2022 год

Источник (район города)	Концентрация, мг/л			рН, ед.	ОСС, г/л	УЭП, мСимен с/м
	Fe ³⁺ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Азотсодержащие компоненты (суммарно), мг/л			
СанПиН [18]	0,3	500	85,623	6-9	1	0,5
Кировский (2021/2022)	0,250	94,925	0,195	7,12	0,25	0,5
	0,223	37,935	0,528	6,33	0,36	0,49
Авиастроительный (2021/2022)	0,210	131,1	0,176	7,17	0,24	0,47
	0,205	35,342	0,093	6,34	0,20	0,39
Горки (2021/2022)	0,220	130,4	0,189	7,22	0,24	0,48
	0,259	18,355	0,01	6,43	0,32	0,43
Ново- Савиновский (2021/2022)	0,250	117,7	0,193	7,24	0,24	0,48
	0,208	32,731	0,103	6,44	0,31	0,42
Московский (2021/2022)	0,240	137,5	0,232	7,21	0,24	0,48
	0,234	26,468	0,073	6,5	0,3	0,43
Приволжский (2021/2022)	0,235	132,3	0,183	7,52	0,37	0,41
	0,244	48,126	0,034	6,47	0,35	0,44

Таблица 3

Усреднённые показатели общей жёсткости, щёлочности и хлоридов за 2021/2022 год

Источник	Жёсткость общая, мг-экв/л	Щёлочность, мг- экв/л	Окисляемость перманганатная, мг/л	Содержание хлоридов, мг/л
СанПиН [18]	7	Не норм.	5,0	350
Кировский (2021/2022)	4,3	2,9	3,5	90
	5,7	2,9	3,8	25
Авиастроительный (2021/2022)	4,3	2,6	3,96	76
	3,9	2,0	4,32	32
Горки (2021/2022)	4,3	2,5	1,8	76
	4,9	1,7	1,28	37
Ново- Савиновский (2021/2022)	4,1	2,8	2,8	76
	4,25	1,5	2,56	33
Московский (2021/2022)	4,3	2,3	3,5	72
	4,25	1,7	4,08	34,5
Приволжский (2021/2022)	4,6	2,4	3,5	85
	5,0	2,1	2,8	34,4

Анализ усреднённых проб воды из таблиц 2 и 3 по исследуемым шести районам города Казань показывает, что все показатели качества питьевой воды, за исключением общей жёсткости, находятся в пределах нормируемых значений в умеренном масштабе. Уровни жёсткости и щёлочности отражают невысокие показатели по выпадению твердой фазы в виде карбонатов данных проб воды. Содержание хлоридов соответствует норме,

следовательно, вода из данных районов Казани не обладает повышенной коррозионной активностью. Из таблицы 3 видно, что перманганатная окисляемость находится в диапазоне нормы. Но если проводить сравнения в рамках отдельных районов, то можем заметить, что самое минимальное значение у воды в районе «Горки», когда как в Авиастроительном районе данный показатель почти в 2,5 раза выше. Повышение данного показателя свидетельствует о незначительном попадании в грунтовые воды органических бытовых отходов, окисляющиеся перманганатом калия. Данный показатель в комбинировании со значениями по содержанию ионов-аммония может свидетельствовать о наличии запаха у воды. Но т.к. содержание ионов аммония незначительное во всех районах г. Казань, то это свидетельствует об отсутствии попадания сточных вод в систему водоснабжения. Обычно превышение данных показателей происходит в паводковый период (апрель-май) и летний (июль-август).

Так как показатели: общее солесодержание, удельная электропроводность, жесткость, щелочность, содержание сульфат-ионов, характеризуют класс и тип возможных отложений на внутренней поверхности трубопроводов, то по результатам можно сделать заключения, что для Кировского района г. Казань наиболее характерны отложения карбонатного типа. Данное заключение было сделано по показателям жесткости и щелочности.

При оценке коррозионной агрессивности воды был произведен анализ следующих показателей: содержание хлоридов, общего железа и водородный показатель. Среднее значение водородного показателя стремится к 7, вода находится в нейтральной области. Чаще всего для снижения скорости коррозии водородный показатель поддерживают на уровне 8,0-8,5, данное значение позволяет существенно снизить интенсивность коррозии. Учитывая, что в анализируемой воде водородный показатель 7, то предполагаем, что скорость коррозионных процессов весьма интенсивна, поэтому в воде присутствуют продукты коррозии, это хорошо заметно по показателю общего железа (III).

Таким образом, экспериментально доказано, что данные пробы воды по шести районам Казани за 2021/2022 года соответствуют нормам, имеют незначительные отклонения друг от друга и могут быть использованы в качестве питьевой воды. Но для улучшения некоторых показателей возможна дополнительная очистка с установкой локальных фильтров, либо корректировкой системы очистки воды.

4. Заключение

Причинами отклонения качества подготовленной воды могут быть: сезонные изменения в виде паводка в весенний период, в летний период (июль-август), кратковременные изменения качества воды в водоисточнике и техногенные факторы.

В рамках данной работы была изучена система водоснабжения города Казань. Описана система подготовки воды, которая заключается в предварительной реагентной обработке воды (коагулянтном, флокулянтном, хлорной водой), дальнейшим отстаиванием и последующим фильтрованием. Казань разбита шесть районов, отбор проб производился произвольно среди потребителей в рамках каждого района. В качестве определяемых показателей были выбраны: общее солесодержание, удельная электропроводность, водородный показатель, общая жесткость, перманганатная окисляемость, щелочность, содержание хлоридов, ионов аммония, общего железа (III), сульфат-ионов. По анализу полученных результатов можно сделать заключение, что вода в районах города соответствует показателям по СанПиН 1.2.685-21, однако для некоторых районов данные показатели близки к рубежной границе. Причиной может быть, как изношенность водопроводных сетей, так и недостаточная степень очистки природной воды. Поэтому в рамках данной работы были подготовлены предложения по мероприятиям, которые могут улучшить некоторые показатели качества:

- анализ трубопроводов водоснабжения на изношенность;
- приборная автоматизация станции очистки воды с целью быстрого выявления резких «скачков» изменений показателей природной воды и быстрое принятие решения по их ликвидации;
- изменение реагентной обработки в паводковый период, с целью улучшения качества очистки. Либо применение экспресс методов, которые позволяют снизить такие

показатели как: перманганатная окисляемость, химическое и биологическое потребление кислорода, мутность. К данным методам относится углевание, заключающееся в дозировании угольной пульпы, которая готовится в специальных баках, где происходит смешение порошкообразного древесного активированного угля с водой. Данный метод весьма несложный, и его можно использовать не постоянно, а по мере необходимости. Также в качестве экспресс метода улучшения показателей качества очищенной воды может выступать сорбент- бентонит. При применении глин есть риск забивки песчаного фильтра, а при угольной обработке таких рисков нет.

Реализация данных мероприятий позволит повысить надёжность работы водопроводного комплекса, обеспечит экологическую безопасность, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт комплекса.

Список литературы/References

1. Батынина М.А., Вахабова Г.Н., Фролов В.К., Руднева А.А. Влияние качества питьевой воды на заболеваемость и смертность населения при патологии органов пищеварения // Студенческий научный форум 2023. Сборник статей VI Международной научно-практической конференции в 2 частях. Пенза, 2023. С. 176-179. [Babynina M.A., Vakhabova G.N., Frolov V.K., Rudneva A.A. Influence of drinking water quality on morbidity and mortality of the population in the pathology of digestive organs // Student Scientific Forum 2023. Collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference in 2 parts. Penza, 2023. P. 176-179.]
2. Архипова Н.С., Елагина Д.С. Актуальные вопросы экологии и безопасности жизнедеятельности в Республике Татарстан // Казань, 2016. – 103 с. [Arkhipova N.S., Elagina D.S. Topical issues of ecology and life safety in the Republic of Tatarstan // Kazan, 2016. – 103 p.]
3. Еремеева С.С., Караганова Н.Г., Гаврилов О.Е. Оценка экологического состояния подземных вод приволжского федерального округа // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 79-84. [Eremeeva S.S., Karaganova N.G., Gavrilov O.E. Assessment of the ecological state of groundwater in the Volga Federal District // Successes of modern natural science. 2020. No. 4. P. 79-84.]
4. Черников В.А., Юнусов Х.Б. Оценка экологического состояния пресных вод и современные эффективные методы ее очистки от загрязнений // АгроЭкоИнфо. 2017. № 1 (27). С. 7. [Chernikov V.A., Yunusov H.B. Assessment of the ecological state of freshwater and modern effective methods of its purification from pollution // AgroEcoInfo. 2017. No. 1 (27). P. 7.]
5. Лопаяева Н.Л., Неверова О.П. Рациональное использование запасов воды // Актуальные проблемы развития агропромышленного комплекса России. Сборник тезисов, подготовленный в рамках круглого стола. 2022. С. 422-423. [Lopaeva N.L., Neverova O.P. Rational use of water reserves // Actual problems of development of the agro-industrial complex of Russia. A collection of abstracts prepared as part of the round table. 2022. P. 422-423.]
6. Долина Л.Ф. Новые методы и оборудование для обеззараживания сточных вод и природных вод. – Днепропетровск: Континент, 2003.-218 с: ил. 42 [Dolina L.F. New methods and equipment for disinfection of wastewater and natural waters. – Dnepropetrovsk: Continent, 2003.-218 p.: ill. 42]
7. Усынина А.Э., Сафронова В.А., Погосян М.П. Определение качества питьевой воды методами химического анализа (на примере г. Астрахани) // Потенциал интеллектуально одарённой молодежи - развитию науки и образования. Материалы IX Международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников. Под общей редакцией Т.В. Золиной. 2020. С. 80-84. [Usynina A.E., Safronova V.A., Poghosyan M.P. Determination of drinking water quality by chemical analysis methods (on the example of Astrakhan) // Potential of intellectually gifted youth - development of science and education. Materials of the IX International Scientific Forum of Young Scientists, Innovators, Students and

- Schoolchildren. Under the general editorship of T.V. Zolina. 2020. P. 80-84.]
8. Харина Г.В., Алёшина Л.В., Анахов С.В., Инжеватова О.В. Мониторинг качества питьевой воды в свердловской области России // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 1 (81). С. 63-73. [Kharina G.V., Alyoshina L.V., Anakhov S.V., Injevatova O.V. Monitoring of drinking water quality in the Sverdlovsk region of Russia // Water and ecology: problems and solutions. 2020. No. 1 (81). P. 63-73.]
 9. Lyubimova T., Lepikhin A., Lane S., Gualtieri C., Roux B. The influence of hydrodynamical regimes at the sylv/chusovaya confluence on drinking water quality in Perm // Perm hydrodynamic scientific readings. Perm, September 26–29, 2018 Пермские гидродинамические научные чтения. Пермь, 26–29 сентября 2018 года
 10. Stoner E.W., Arrinton D.A. Nutrient inputs from an urbanized landscape may drive water quality degradation // Sustainability of water quality and ecology, 2017. P. 136-150
 11. Заводовский А.Г. Определение сухого остатка питьевой воды методом пьезокварцевого микровзвешивания // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 99-102. [Zavodovsky A.G. Determination of the dry residue of drinking water by piezo quartz micro-weighing // Omsk Scientific Bulletin. 2020. No. 5 (173). P. 99-102.]
 12. Гареева К.А., Иванова У.В. Разработка экспериментальной установки для очистки воды холодного водоснабжения до питьевого качества // Тинчуринские чтения - 2020 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Казань, 2020. С. 22-25. [Gareeva K.A., Ivanova U.V. Development of an experimental installation for purification of cold water supply water to drinking quality // Tinchurinskie readings - 2020 "Energy and digital transformation". Materials of the International Youth Scientific Conference. In 3 volumes. Under the general editorship of E.Y. Abdullazyanov. Kazan, 2020. P. 22-25.]
 13. Тунакова Ю.А., Мингазетдинов И.Х., Габдрахманова Г.Н., Валиев В.С., Кузнецова О.Н. Технология доочистки и минерализации питьевых вод для обеспечения химической безопасности и физиологической полноценности в конечной точке потребления. // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 6. С. 88-92. [Tunakova Yu.A., Mingazetdinov I.Kh., Gabdrakhmanova G.N., Valiev V.S., Kuznetsova O.N. Technology of post-treatment and mineralization of drinking water to ensure chemical safety and physiological usefulness at the end point of consumption. // Bulletin of Technological University. 2019. Vol. 22. No. 6. P. 88-92.]
 14. Новикова С.В., Тунакова Ю.А., Файзуллин Р.И., Габдрахманова Г.Н. Определение пороговых концентраций катионов металлов в поверхностных водах, используемых для приготовления вод питьевого качества на примере г. Казани // Экологический мониторинг промышленно-транспортных комплексов. Научный симпозиум шестого международного экологического конгресса (восьмой Международной научно-технической конференции). 2017. С. 119-125. [Novikova S.V., Tunakova Yu.A., Fayzullin R.I., Gabdrakhmanova G.N. Determination of threshold concentrations of metal cations in surface waters used for the preparation of drinking water on the example of Kazan // Environmental monitoring of industrial and transport complexes. Scientific Symposium of the Sixth International Environmental Congress (Eighth International Scientific and Technical Conference). 2017. P. 119-125.]
 15. Li S., Wang X., Guo Y., Hu J., Lin S., Tu Y., Chen L., Ni Y., Huang L. Recent advances on cellulose-based nanofiltration membranes and their applications in drinking water purification: a review // Journal of Cleaner Production. 2022. T. 333. P. 130171.
 16. Pohrebennyk V., Shybanova A., Kłos-Witkowska A., Ripak N., Borowik B. Purification of drinking water from iron with the help of activated zeolites // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. P. 755-762.

Информация об авторах

Софья Николаевна Медведева, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: sofya3101@bk.ru

Алёна Юрьевна Власова, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: vlasovaay@mail.ru

Рустем Ренатович Вилданов, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: rustrenat@rambler.ru

Information about the authors

Sofya N. Medvedeva, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

E-mail: sofya3101@bk.ru

Alyona Y. Vlasova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

E-mail: vlasovaay@mail.ru

Rustem R. Vildanov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

E-mail: rustrenat@rambler.ru



Архитектурно-планировочные особенности здания психиатрической клиники начала XX вв. в Казани

Х.Г. Надырова¹, А.Т. Хайруллина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Психиатрическая клиника в Казани в силу специфики лечебного назначения определенными архитектурно-планировочными особенностями. Они отражали уровень достижений в проектировании и строительстве зданий медицинских учреждений подобного рода на начало XX века в Казани и Казанской губернии в целом. *Актуальность* исследования вызвана недостаточной изученностью данного объекта культурного наследия. *Предметом* исследования являются особенности объемно-планировочной структуры и стилистики здания. *Методика* исследования включает в себя изучение архивных документов, библиографических материалов и натурные обследования здания, проведение комплексного анализа объекта специальными видами исследований (сравнительный, композиционный, стилистический и др. виды анализов). *Целью* работы является изучение особенностей архитектуры психиатрических университетских клиник на примере здания Психиатрической клиники Казани. Для достижения цели исследования решались следующие задачи исследования: 1. Провести библиографические и архивные изыскания по теме исследования. 2. На основе выявленных данных из библиографических источников, архивных документов и материалов проведенного авторами натурального обследования здания проанализировать архитектуру Психиатрической клиники Казани. 3. Сопоставить полученные результаты с данными по архитектуре подобных клиник других регионов России и выявить особенности объемно-планировочной структуры и стилистики здания. Выполненная работа позволила в качестве *результатов* исследования выявить особенности объемно-планировочного решения и стилистики здания и соотнести их с решениями подобного типа зданий в других городах России в начале XX века. *Выводы* исследования позволяют установить общие архитектурно-планировочные принципы организации таких специфических зданий, как психиатрические клиники России начала XX в.

Ключевые слова: архитектура, психиатрические клиники, объемно-планировочные особенности

Для цитирования: Надырова Х.Г., Хайруллина А.Т. Архитектурно-планировочные особенности здания психиатрической клиники начала XX вв. в Казани // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.168-181, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.17, EDN: XDOCOM

Architectural and planning features of the psychiatric clinic building of the early XX century in Kazan

Kh.G. Nadyrova¹, A.T. Khairullina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. Psychiatric clinic in Kazan due to the specifics of the medical purpose had certain architectural and planning features. They reflected the level of achievements in the design and construction of buildings of medical institutions of this kind at the beginning of XX century in Kazan and the Kazan province as a whole. The relevance of the study is caused by the

insufficient study of this cultural heritage site. The subject of the study is the features of the spatial planning structure and style of the building. The research methodology includes the study of archival documents, bibliographic materials and full-scale surveys of the building, conducting a comprehensive analysis of the site with special types of research (comparative, compositional, stylistic, etc. types of analyses).

The aim of the work is to study the features of the architecture of psychiatric university clinics using the example of the building of the Psychiatric Clinic in Kazan. To achieve the purpose of the study, the following research tasks were solved: 1. to conduct bibliographic and archival research on the topic of the study. 2. to analyze the architecture of the Psychiatric Clinic in Kazan based on the revealed data from bibliographic sources, archival documents and materials of the full-scale survey of the building conducted by the authors. 3. to compare the results obtained with data on the architecture of similar clinics in other regions of Russia and identify the features of the spatial planning structure and style of the building. The work performed made it possible, as the results of the study, to identify the features of the spatial planning solution and the style of the building and correlate them with solutions of this type of buildings in other cities of Russia at the beginning of XX century. The conclusions of the study allow us to establish general architectural and planning principles of the organization of such specific buildings as psychiatric clinics in Russia at the beginning of XX century.

Keywords: architecture, psychiatric clinics, spatial planning features

For citation: Nadyrova Kh.G., Khairullina A.T. Architectural and planning features of the psychiatric clinic building of the early XX century in Kazan // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.168-181, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.17, EDN: XDOCOM

1. Введение

В составе ведущих университетов Российской империи находились медицинские университеты, для которых в последней трети XIX века возводились специальные комплексы университетских клиник, в т.ч. и Казани. Одним из последних до революции 1917 г. было построено здание Психиатрической клиники. В настоящее время это здание функционирует по первоначальному назначению. Поскольку оно относится к объектам культурного наследия, требуется не только его сохранение, но и изучение. Важно выяснить - обладает ли данное здание определенными архитектурно-планировочными особенностями, которые отражали бы уровень достижений в проектировании и строительстве зданий медицинских учреждений подобного рода в начале XX века в Казани. Поэтому актуальность исследования вызвана недостаточной изученностью данного объекта.

История развития и архитектура университетских клиник России недостаточно исследована. Однако интерес к истории медицины России и появлению зданий медицинских учреждений в СССР проявился уже в довоенные годы XX века, когда появились первые переводные издания, в которых помимо краткого исторического экскурса рассматривались принципы проектирования и строительства больниц, в частности, в Германии¹. К этому периоду относится и специальное издание по архитектуре лечебных зданий, в котором представлен обзор по историческому развитию больниц в дореволюционный период, и рассмотрены особенности проектирования больничных корпусов советского периода². Впервые обзор медицинских учреждений России 2-й половины XVIII – середины XIX и 2-й половины XIX – начала XX вв. был выполнен соответственно в VI и X томах Всеобщей истории архитектуры³. В них

¹Больничное строительство / Г. Винтерштейн, Р. Шахнер ; пер. с нем. д-ра Е. Л. Горкера; под ред. и с пред. инж. В. Восейкова. - Москва; Ленинград: Медгиз, 1933 (М.: «Полиграфкнига»). - 296 с.

² Дунаевский А.Ю. Архитектура лечебных зданий. - Москва : Изд-во Акад. архитектуры СССР, 1940. - 348 с.

³ Всеобщая история архитектуры в 12-ти томах. Т. 6: Архитектура России, Украины и Белоруссии. XIV - первая половина XIX вв. Максимов П.Н. (ред.). М: Стройиздат. – 1968. – 588 с.; Всеобщая

рассматривается история развития архитектуры общественных зданий на примере Приказов общественного призрения, богаделен, домов умалишенных и др. Исследовались объемно-планировочные и архитектурно-композиционные особенности, а также технические инновации инженерного обеспечения зданий больниц Санкт-Петербурга⁴. Для углубленного понимания архитектуры медицинских учреждений привлекалась литература по истории медицины и ее отдельных регионов [1,2]. С накоплением информации и расширением исследований уточнялась периодизация развития архитектуры медицинских учреждений прошлого и настоящего⁵. Отдельно рассматривались вопросы размещения больниц, их функциональной, планировочной и пространственной организации [3,4]. В XXI в. изучались медицинские комплексы специального назначения [5-7]. В этом перечне особое место занимали медицинские учреждения для душевнобольных. Изучались специфика оказания психиатрической помощи больным и размещение специальных учреждений в г.Казани⁶, анализировались формирование и развитие архитектуры лечебниц для душевнобольных, как специфического типа психиатрических учреждений зарубежом [8-10]. Зарубежные авторы уделяют внимание созданию удобной лечебной среды благодаря возможностям дизайна [11, 12]. Важным является зонирование пространства лечебных учреждений с созданием оптимальных маршрутов продвижения пациентов [13-15]. В ответ на текущие и потенциальные вспышки пандемий возникла необходимость в модульных быстровозводимых медицинских пунктов [16].

В настоящий момент отечественные авторы изучают опыт территориального размещения лечебно-профилактических учреждений, рассматривают вопросы их проектирования. Как правило, речь идет о лечении физических недугов [17,18]. Вопросы размещения больничных комплексов в планировочной структуре города Казань, в том числе история строительства первого окружного дома для умалишенных были частично затронуты в предыдущих исследованиях авторов [19,20].

Таким образом, библиографический анализ показал, что комплексные исследования архитектурно-планировочных особенностей здания Психиатрической клиники начала XX века в Казани не проводились.

Целью работы является изучение особенностей архитектуры психиатрических университетских клиник на примере здания Психиатрической клиники Казани.

Задачи исследования: 1. Провести библиографические и архивные изыскания по теме исследования. 2. На основе выявленных данных из библиографических источников, архивных документов и материалов проведенного авторами натурного обследования здания проанализировать архитектуру Психиатрической клиники Казани. 3. Сопоставить полученные результаты с данными по архитектуре подобных клиник других регионов России и выявить особенности объемно-планировочной структуры и стилистики здания.

Объект исследования – здание Психиатрической клиники Казани. *Предметом* исследования являются особенности объемно-планировочной структуры и стилистики здания.

2. Материалы и методы

Материалами исследования послужили библиографические источники по теме исследования, текстовые и графические документы Государственного архива Республики Татарстан, Отдела редких книг и рукописей Научной библиотеки Поволжского

история архитектуры. В 12-ти томах. - Т. 10: Архитектура XIX - начала XX вв. С.О. Хан-Магомедова (отв. ред.) и др. - 1972. - 592 с.

⁴ Пунин А.Л. Архитектура Петербурга середины XIX века. - СПб: Изд-во Крива, 2011 г. – 592с.

⁵ Ахметьянов Л.А. Ключкин И.В., Дерюжов В. М. Казанскому военному госпиталю - 200 лет // Казанский медицинский журнал. – 2009. – Т. 90, № 2. – С. 11-19. – EDN KYAYVP.

Тетенев Ф. Ф., Карзилов А. И. История строительства факультетских клиник Сибирского государственного медицинского университета // Бюллетень сибирской медицины. – 2006. – Т. 5, № 4. – С. 147-153. – EDN HVQRNF.

⁶ Менделевич Д. М., Созинов А. С., Морозова Е. В. История организации помощи психически больным в Казани и в Казанской губернии от становления до конца XIX века /// Казанский медицинский журнал. – 2012. – Т. 93, № 1. – С. 146-152. – EDN OWGNNB.

Федерального университета и также материалы натуральных обследований здания Психиатрической клиники (схемы, кроки и обмеры).

Методика исследования включает в себя изучение архивных документов, библиографических материалов и натурального обследования здания, проведение комплексного анализа объекта со специальными видами исследований (сравнительный, композиционный, стилистический и др. виды анализов).

3. Результаты и обсуждение

История проектирования и строительства Психиатрической клиники

Казанский императорский университет, основанный в 1804 г., имел четыре отделения, одно из которых было медицинское (1814 г.). Для практической подготовки врачей большое значение имели университетские клиники, где лечили больных. Первая клиника была организована в 1815, специальное здание для которой появилось только в 1832 году и позднее получила название Старой клиники. В нем уже разместились специализированные клиники: терапевтическая, акушерская, хирургическая. В 1863 г. императором Александром II вместо отделений был учрежден медицинский факультет Казанского Императорского университета. К 1880-м гг. здание Старой клиники с трудом вмещало уже шесть факультетских клиник. Детская и психиатрическая клиники были вынуждены размещаться в городских больницах. В 1890 г. КИУ направил в Министерство народного просвещения ходатайство о выделении денежных средств на постройку новых клинических зданий. Денег на строительство клиник было выделено значительно меньше запрашиваемых. Для комплекса Новых клиник университета вместо 8 было выстроено 6 каменных корпусов в пустом квартале на Арском поле: акушерско-гинекологическая и глазная клиника каждая на 30 кроватей расположились в одном корпусе, к которому была пристроена церковь на средства И. Алафузова; хирургическая клиника на 30 кроватей, клиника кожных и венерических болезней на 25 кроватей, построенная на средства И. Алафузова; Детская клиника на 20 кроватей и при ней 4 деревянных двухэтажных барака для заразных больных и отдельно деревянное здание амбулатории; кухня и контора, прачечная с дезинфекционной камерой.

Строительство психиатрической клиники было отнесено к третьему этапу строительства, ввиду чего отложено на неопределенный срок. Необходимость строительства нового здания поддерживалась и Казанским учебным округом, и Министерством народного просвещения, однако строительство не начиналось более 20 лет. Первоначально здание психиатрической клиники на 35 кроватей в 1900 г. спроектировал архитектор И.Н. Колмаков. В архивных фондах ГА РТ сохранились чертежи планов и разреза данного проекта, однако, в них отсутствует ситуационная схема, ввиду чего сложно сказать с уверенностью, на каком именно участке предполагалось размещение объекта. В 1904 г. на нынешнем месте психиатрической клиники архитектором К.Л. Мюфке была запроектирована клиника патологической анатомии, судебной медицины и оперативной хирургии. Здание имело вид замкнутого каре, ориентированного по сторонам света (Рис.1). К.Л. Мюфке в это время работал архитектором Казанского Императорского университета.

В 1909 году К.Л. Мюфке занял должность архитектора-строителя Саратовского университета и переехал в Саратов. По его проектам в период между 1909-м и 1932 годами построили четыре корпуса в комплексе Саратовского университета и здание медицинской клиники для обучения студентов. В 1909-1911 г. должность архитектора КИУ занимал И.И. Брюно. Как задание на проектирование Психиатрической клиники профессором В.П. Осиповым был составлен перечень необходимых помещений и рекомендаций по организации клиники.

Согласно им И.И. Брюно и составил новый проект здания, который был рассмотрен в Министерстве народного просвещения и был признан неприемлемым. Проект клиники было поручено переработать архитектору Министерства народного просвещения. В период 1909–1911 гг. там служил архитектор Л.П. Шишко, который, очевидно, и доработал проект клиники, а позже составил сметы на её строительство, утвержденные в декабре 1911 года.



Рис. 1. Генплан участка клиники патологической анатомии, судебной медицины и оперативной хирургии КИУ. 1904 г., арх. К.Л. Мюфке. (Источник: ГА РТ, ф.2, оп.15, № 255)

Fig. 1. The general plan of the site of the clinic of pathological anatomy, forensic medicine and operative surgery of KIU. 1904, architect K.L. Mufke (Source: GA RT, f.2, op.15, No. 255)

20 мая 1912 г. был заложен первый камень клиники. Для строительства была утверждена специальная строительная комиссия, в состав которой вошли ректор Университета Г.О. Дормидонтов, член правления С.П. Шестаков, профессор по кафедре психиатрии В.П. Осипов, ассистент кафедры психиатрии Н.А. Донской, строитель И.И. Брюно, архитектор Управления учебного округа С.В. Бечко-Друзин, председатель Государственного контроля старший ревизор И.Е. Грандилевский⁷.

К концу сентября 1914 года были выполнены все основные работы по строительству здания и благоустройству территории.

Генплан Психиатрической клиники

Для строительства здания Психиатрической клиники Казанской городской думой был выделен участок юго-западнее Военного госпиталя. Территория домовладения сохранилась в исторических границах. По периметру участка тянется глухая кирпичная ограда. На территории сохранились исторические одноэтажные кирпичные службы.

Согласно проекту клиника была рассчитана на 50 больных, 30 из которых мужчины, 20 – женщины. Здание клиники в плане имело симметричную Н-образную конфигурацию и в градостроительном плане было удачно размещено на изгибе продолжения улицы Новогоршечной (ныне ул.Бутлерова) по оси северо-восток и юго-запад (Рис. 2). Таким образом, ни одно помещение не имело только северного освещения. Перед главным входом разместился небольшой курдонер, огражденный от улицы легкой металлической оградой на кирпичном основании. С западной и восточной сторон здания расположился сад, с северной - асфальтированный двор, по границе с военным госпиталем – расположились кирпичные службы: погреб, ледник, навес для дров, помещение для животных [21]. Учитывая небольшой коечный фонд клиники, а также небольшие финансовые возможности, здание было запроектировано однокорпусным двухэтажным с подвалом, а не павильонного типа.

⁷ ГА РТ. Ф. 977, оп. 604, № 188 1913 г.



Рис. 2. Генплан Психиатрической клиники. 1911 г., арх. Л.П. Шишко. (Источник: 21. Осипов В.П. К открытию клиники душевных болезней Императорского Казанского Университета Неврологический вестник Том XXI, № 3 (1914) – С. 763-810

Fig. 2. The general plan of the Psychiatric clinic. 1911, architect L.P. Shishko. (Source: 21. Osipov V.P. Towards the opening of the clinic of mental diseases of the Imperial Kazan University Neurological Bulletin Vol. XXI, No. 3 (1914) – P. 763-810

Из окон второго этажа здания вид на окрестности был весьма привлекательным, так как здание расположилось в высокой части города, и на юго-запад открывался живописный вид на волжские просторы, с юга виднелась овражистая часть города, с северной части - госпитальный сад.

Для увеличения территории сада клиники требовалась засыпка существующего оврага. По предложению строителя И.И. Брюно был привезен грунт из центральной части города, где в то время возводилось здание банка. Ввиду невозможности устройства ограды на насыпной части территории сада госпиталя, И.И. Брюно предложил в этой части сделать деревянный забор на металлических столбах.

Объемно-планировочная структура здания Психиатрической клиники

Двухэтажное кирпичное здание имеет симметричную структуру, которая состоит из двух прямоугольных в плане крыльев, объединенных горизонтальным средним корпусом, где левое крыло было мужским, а правое – женским. В ГА РТ сохранились чертежи здания⁸ (Рис. 3). В средней части здания расположились вестибюль, парадная лестница в аудиторию и на второй этаж. Под аудиторией расположились помещения для сиделок. Ввиду того, что женских палат было запроектировано меньше, архитектор смог в этой половине устроить небольшую квартиру для ассистента клиники, а также психофизиологическую лабораторию. Кроме того, в этой же части здания было запроектировано отделение для заразных больных (передняя, палата и ванная). Эта часть не сообщалась с другими помещениями и имела отдельный выход на улицу.

В мужском и женском крыльях здания предусмотрены отделения для спокойных больных (окна выходили на улицу), слабых и возбужденных больных (окна выходили на дворовую территорию). Так же в планировке здания были предусмотрены дневные и ночные помещения, а также помещения общего пребывания, помещения для временной изоляции буйных пациентов. Спецификой здания является большое устройство дверей, отделяющих блоки помещений различного назначения. Но внешне эти палаты не отличались от остальных, разве что переплеты в окнах имели более частые импосты и матовые толстые стекла. Верхние этажи предназначались для спокойных больных. В мужской половине второго этажа так же разместились помещения для служителей, комната для лекционного разбора, кабинет профессора, анатомико-физиологическая лаборатория, комната для занятия фотографией, электротерапевтический кабинет,

⁸ ГА РТ. Ф.977, оп. 604, № 182.

операционная, помещение для живущего в клинике ординатора. В здании помимо парадной лестницы было предусмотрено в каждом крыле по 2 лестницы, ведущих на улицу. Такое решение позволяло обособить отделения учреждения в отсутствие возможности строительства отдельных павильонов.

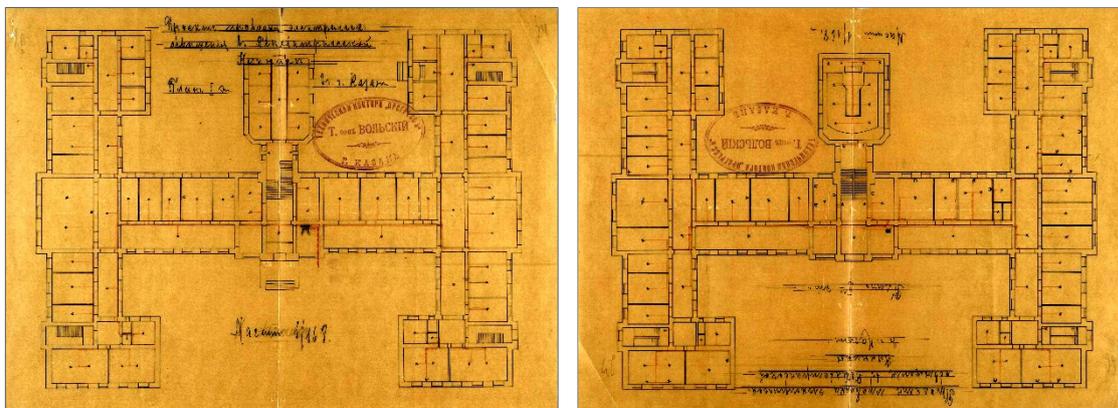


Рис. 3. План 1-го этажа (слева) и 2-го этажа (справа) здания Психиатрической клиники
(Источник: ГА РТ. Ф.977, оп. 604, № 182)

Fig. 3. Plan of the 1st floor (left) and 2nd floor (right) of the Psychiatric Clinic building (Source: GA RT. F.977, op. 604, No. 182)

Аудитория для 200 студентов разместилась в центральной части по оси здания в выступающем во двор объеме. Этот объем разделял дворики больных женского и мужского отделений. В аудитории устроен амфитеатр, под высокой частью которого хранились необходимые для занятий рисунки и приборы.

Подвал был устроен не под всем зданием, в нем располагались водолечебница московской фирмы Сакс с комнатой для раздевания больных, амбулатория, комната для встречи с посетителями, комната дежурного врача, библиотека, обширная палата для постельного содержания, комнаты, технические помещения, мастерская, цейхгауз, квартиры служителей, кухня.

Инженерные системы здания Психиатрической клиники

В здании клиники были применены современные технические решения. Впервые в подобных заведениях было применено паро-бетонное отопление по системе инженера Яхимовича. Новаторство такого отопления было в том, что проложенные в стенах каналы обмазывались бетоном, который долго удерживал тепло и передавал его в помещения. Печи в здании во избежание трещин были оклеены бязью по инструкции инженера Яхимовича. С этим отоплением была соединена система вентиляции, работающая при помощи электричества. Воздух подавался из труб сверху, что обеспечивало чистоту воздуха. Он проходил в помещение воздушной камеры подвального этажа, очищался при помощи водяного фильтра, и только после этого согревался и поступал во внутренние помещения клиники. Для дезинфекции инфекционного отделения были предусмотрены трубы, через которые подавался пар. Точно такое же решение было и в операционном зале. В каждом отделении располагался буфет для подогрева пищи, сюда же была проведена горячая вода, которая в отопляемый период поступала от общего котла, а в летний период - от специального котла. В части пожарной безопасности были предусмотрены все необходимые меры: каменные стены и железобетонные своды в рекреационных коридорах, на случай пожара внутри здания были размещены пожарные рукава.

В вечернее время здание освещалось при помощи электрических лампочек. Предусматривалось и дежурное освещение. В здании был предусмотрен специальный аппарат, позволяющий отследить посещение больных дежурным персоналом. Это были электрические часы, которые делали отметку на бумажном циферблате при повороте

ключом контактных штифтиков, имеющихся в каждом отделении. Для удобства между отделениями был устроен внутренний телефон.

В Казани в то время в этой части города не было городской канализации, поэтому пришлось устроить во дворе клиники обширные цистерны для нечистот, которые вывозились за плату. Это доставляло массу неудобств, но до прокладки общей городской канализации это было единственным выходом.

Для облицовки здания применялся красный машинный кирпич заводчика Кудряшева⁹. Кровельное железо было закуплено на Юго-Камском заводе графини Е.А. Воронцовой–Дашковой¹⁰. В наружные оконные переплеты вставлялись одинарные бемские стекла фирмы Пашкова. Стекла внутренних рам предполагались различными по толщине в зависимости от назначения помещения.

Стилистика фасадов здания Психиатрической клиники

Фасады здания клиники были оформлены в стиле рационального модерна с элементами эклектики. Главный фасад композиционно разделен на три части: двух выступающих крыльев в 5 оконных осей и заглубленной центральной части в 15 оконных осей. Оформление фасада было выполнено в сочетании краснокирпичных элементов и оштукатуренных и окрашенных светлой охрой поверхностей (Рис. 4). Из декоративных элементов использованы кирпичные выступающие наличники, замковые камни над оконными проемами, пояса кирпичных поребриков под и над окнами верхнего этажа во фризе, карнизные дентикулы, простые кронштейны, поддерживающие венчающий карниз, угловые элементы в виде сталактитов, аттиковые кирпичные стенки с поребриками над выступающими ризалитами. Первый этаж был оштукатурен с имитацией крупноформатного камня и фактурно рустован, верхние этажи оштукатурены гладко, декоративные элементы без штукатурки. Были предусмотрены большие окна с металлическими переплетами, позволяющими большему количеству света проникать в помещения¹¹ (Рис.5). Такое решение позволило придать зданию обычный вид общественного здания и не акцентировать внимание на назначении здания.



Рис. 4. Общий вид здания Психиатрической клиники. Фото 1928–1930 гг. из фондов музея КФУ (Источник: фото И. Мирофанова)

Fig. 4. General view of the Psychiatric Clinic building. Photos of 1928-1930 from the funds of the KFU Museum (Source: photo by I. Mirofanov)

⁹ ГА РТ. Ф.977, оп.604, № 179, 1912

¹⁰ ГА РТ. Ф.977, оп.604, № 191, 1914

¹¹ ГА РТ. Ф.2, оп. 15, № 1316

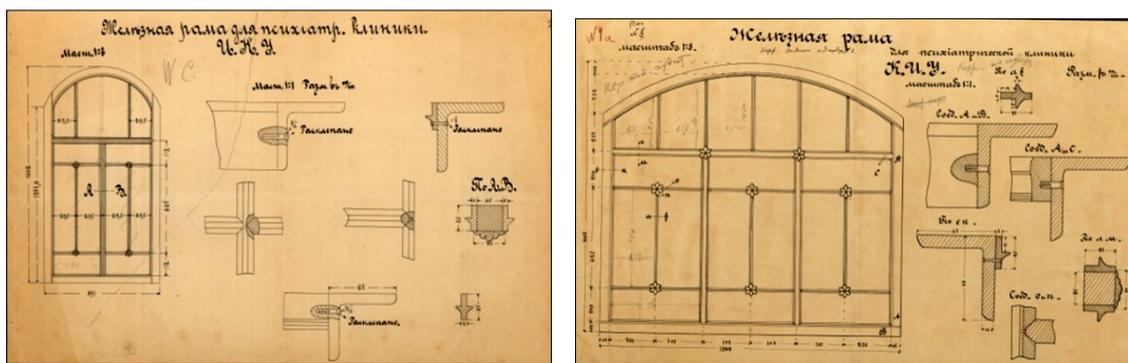


Рис. 5. Оконные рамы клиники с металлическими переплетами

(Источник: ГА РТ. Ф.2, оп. 15, № 1316)

Fig. 5. Window frames of the clinic with metal bindings

(Source: GA RT. F.2, op. 15, No. 1316)

Интерьеры здания Психиатрической клиники

Интерьерные решения здания отражали специфический характер назначения объекта. Примыкания потолков и стен были закругленные, потолочные тяги использовались лишь в вестибюле, в рекреационных коридорах, парадной лестнице, аудиториях и квартире ассистента. Стены были окрашены масляной краской, полы были четырех видов: в основных помещениях первого и второго этажей полы паркетные дубовые, выложенные на асфальтовое основание; в мокрых помещениях, вестибюле и лабораториях была выложена плитка, в подвальном помещении полы бетонные, в помещениях служителей деревянные. Вместо деревянных были выполнены бетонные подоконники. Полы водолечебницы были выложены плиткой с голубыми вкладышами и с фризом. Обстановка клиники была весьма простой и отличалась лишь типом контингента – палаты спокойных больных были более комфортабельными и изящно обставленными. Из развлечений были бильярд, рояль и библиотека. Помещения отделения для заразных больных были с закругленными углами, полы отделаны плиткой, стены выкрашены масляной краской.

В настоящее время здание принадлежит государственному автономному учреждению здравоохранения «РКПБ им. акад. В.И.Бехтерева МЗ РТ». В целом здание сохранило свой исторический облик и дошло без значительных перестроек. В интерьерах сохранился подлинный лепной декор потолков, двойные филенчатые двери с арочной фрамугой, напольное покрытие ряда помещений выложено метлахской плиткой, парадная двухмаршевая лестница с кованым ограждением в стиле модерн. В большей мере сохранились также оригинальные металлические переплеты оконных проемов, которые в ходе эксплуатации здания претерпели ряд изменений в виде устройства в них форточек из современных материалов.

Изучение здания Психиатрической клиники Казанского Императорского университета позволило в качестве *результатов* исследования выявить его объемно-планировочные особенности, свойственные специфическим зданиям медицинского назначения. Здания подобного назначения строились на протяжении XIX века в странах западной Европы и США. Исследователи отмечали: «В этих странах различные планировочные схемы носили на протяжении века национальный характер. Они складывались и развивались по большей части каждая в своей стране под влиянием авторитетов в области психиатрии. В Великобритании господствовали радиальный и коридорный планы, во Франции – система изолированных дворов, в США – линейный план Киркбрайда. Лишь во второй половине XIX века, благодаря развитию медикаментов и принятию в больницы всё большего числа людей с более легкими формами болезни, почти повсеместно произошел переход на павильонный тип застройки» [9].

В конце XIX - начале XX вв. были построены клиники во многих городах, где при Императорских университетах были медицинские факультеты: Москве, Саратове, Дербте, Харькове и др. городах. Сравнительный анализ психиатрических клиник в

Москве, Саратове и Казани показал, что архитекторы зачастую принимали за основу сложную композицию П-образного или Н-образного плана здания, размещая симметрично крылья, которые в свою очередь разделялись на женские и мужские половины. Такая композиция позволяла разместить небольшие садики для прогулки больных в границах клиники. Композиции главных фасадов тяготели к симметрии и трехчастности, где главный центральный объем с входом в здание выступал вперед и по высоте. Все рассматриваемые при сравнительном анализе объекты были выстроены в стиле модерн с элементами эклектики. Сравнительный анализ объемно-планировочных структур этих клиник позволил выявить особенности, свойственные данным типам зданий: коридорная система, общая симметричность объемов зданий, разделение на женские и мужские половины, размещение большого количества служебных лестниц для изолированного входа и выхода персонала и больных для прогулок, разделение блоков дверями, ограничение высоты зданий двумя этажами из-за опасности суицидов, совмещение учебных и лечебных функций и т.д..

Для периода последней четверти XIX – начала XX вв. было характерно разделение врачебной практики на специальности и строительство специализированных больниц нового типа, к которым относятся университетские клиники в Москве, выстроенные по павильонному типу. Такой принцип позволил избегать замкнутых дворов, обеспечить необходимую инсоляцию и разделить здания по заболеваниям пациентов. Повсеместно начинают строиться больницы не в виде одного большого здания, а как ряд отдельно стоящих лечебных корпусов и вспомогательных сооружений, расположенных изолировано друг от друга среди зелени. Помимо комплексов для небольшого количества пациентов строились клиники в виде единого корпуса. Аналогом Психиатрической клиники Казани может служить московская Психиатрическая клиника им. А.А. Морозова, 1887 г., архитектора К.М. Быковского. Это симметричное, П-образное в плане с боковыми, горизонтально выступающими объемами и центральным, выступающим по высоте и размещенным по оси симметрии входным объемом, двухэтажное здание из красного кирпича. По своим масштабным характеристикам близко зданию Казанской психиатрической клиники, построенной спустя 30 лет в стилистике модерна с элементами эклектики.

Сравнительный анализ показал, что в здании Психиатрической клиники, как и в общемировой практике начала XX в. и, в первую очередь, в США, большое внимание при проектировании уделялось вопросам противопожарной безопасности. А именно: увеличивалось количество лестниц и выходов из зданий, практически отказывались от деревянных элементов в интерьерах и применяли огнестойкие материалы и фурнитуру [22].

Архитектурно-планировочное решение Казанской психиатрической клиники значительно отличалось от стереотипов прежних веков, когда больницы подобного типа напоминали тюрьмы. Эти два учреждения (тюрьма и психбольница) отражали философию и эстетику, которые неотделимы от их архитектуры и внутренней планировки [23]. Именно облик здания Психиатрической клиники с большими окнами, оформлением фасадов в стиле модерн, дворцовой планировочной структурой подтверждали этот тезис и диаметрально разделяли эти два типа здания в начале XX века.

В этот период большое значение придавалось природному окружению психиатрических клиник, поскольку природа считалась главной силой для исцеления и восстановления в подобных учреждениях. В современной практике проектирования «архитектуры исцеления» вновь дискутируется вопрос о роли природы. Исследователи склоняются к мнению, что ощущение «жизненной силы» у пациентов появляется от природного окружения здания, а не от включения «природы» во внутреннее пространство зданий [24]. Это еще раз подтверждает, что некоторые требования к проектированию и размещению зданий психиатрических клиник в конце XIX - начале XX вв. не утратили свою силу и сегодня.

4. Заключение

Проведенное исследование Психиатрической клиники Казанского университета позволило сделать следующие выводы:

1. Установлено, что автором проекта Психиатрической клиники в Казани был архитектор Министерства народного просвещения России Л.П. Шишко, переработавший первоначальный неутвержденный проект архитектора КИУ И.И. Брюно.

2. При размещении здания клиники вблизи обширного и озелененного комплекса Военного госпиталя на одном из самых высоких участков города были выдержаны все отечественные и международные требования к размещению подобных медицинских учреждений (озелененные и хорошо проветриваемые участки).

3. Архитектурно-планировочное решение и стилистика здания отвечали самым современным на тот период принципам и приемам проектирования и строительства зданий данного типа:

- отличие облика клиники от тюремных зданий, с которыми ранее они ассоциировались, за счет парадности, устройства больших окон, оформления фасадов в стиле модерн;

- симметричная композиция здания для обеспечения равного гендерного разделения больных в одинаковых боковых крыльях здания;

- совмещение образовательной и лечебных функций в здании путем устройства палат для больных, учебной аудитории (зала), лабораторий и др. для студентов и профессуры;

- насыщение здания современным инженерным оборудованием, обеспечивающим комфортное лечение, проведение научных исследований и обучения (отопление, вентиляция, горячее и холодное водоснабжение, электричество, телефонная связь);

- требование соблюдения личной и пожарной безопасности сотрудников и специфических больных, которое обусловило появление архитектурно-планировочных особенностей зданий данного типа. Особенности проявлялись в устройстве дополнительных лестниц и выходов наружу, размещении санитарно-технических лечебных помещений в подвальной части здания, соблюдении требования устройства данного типа зданий не выше двух этажей, разделении коридоров дверями для изоляции блоков помещений, сглаживании углов в интерьерах и т.д.

4. В проектировании и строительстве зданий психиатрических клиник, как в России, так и за рубежом, в конце XIX-начале XX вв. придерживались общих принципов и приемов, необходимых для эффективного и комфортного функционирования зданий данного назначения.

Список литературы / References

1. Симонян Р.З. История медицины России: со времен Древней Руси до российской медицины XX столетия / Р.З. Симонян. – Чебоксары: «Среда», 2023. – 168 с. [Simonyan R.Z. History of medicine in Russia: from the times of Ancient Rus' to Russian medicine of the XX century / R.Z. Simonyan. – Cheboksary: "Sreda", 2023. – 168 p.]
2. Скобей И.Г. Медицинский Кёнигсберг/ И.Г. Скобей. – Калининград: «Живем», 2023. – 272 с. [Skobey I.G. Medical Königsberg/ I.G. Scobey. – Kaliningrad: "We Live", 2023. – 272 p.]
3. Гайкова Л. В., Родина Н. С. Исторический путь архитектурного развития лечебных зданий и комплексов // Творчество и современность. – 2018. – № 1(5). – С. 18-34. [Gaikova L.V., Rodina N.S. Historical path of architectural development of medical buildings and complexes // Creativity and modernity. – 2018. – No 1(5). – P. 18-34.] – EDN UPMFPW
4. Крылова М.А. Этапы формирования и развития архитектуры учебных заведений медицинского профиля в России и за рубежом на протяжении XVIII–XXI веков // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-formirovaniya-i-razvitiya-arhitektury-uchebnyh-zavedeniy-meditsinskogo-profilya-v-rossii-i-za-rubezhom-na-protyazhenii-xviii> (дата обращения: 29.01.2024) [Krylova M.A. Stages of formation and development of the

- architecture of medical educational institutions in Russia and abroad during the 18th–21st centuries // *Science, education and experimental design*. 2020. No 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-formirovaniya-i-razvitiya-arhitektury-uchebnyh-zavedeniy-meditsinskogo-profilya-v-rossii-i-za-rubezhom-na-protyazhenii-xviii> (date of access : 01/29/2024)]
5. Лисицына А. В. Архитектура больничных комплексов в торгово-промышленных селах Нижегородской губернии на рубеже XIX-XX вв // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2012. – № 3(36). – С. 80-90. [Lisitsyna A.V. Architecture of hospital complexes in commercial and industrial villages of the Nizhny Novgorod province at the turn of the 19th-20th centuries // *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building*. – 2012. – No. 3(36). – P. 80-90.] – EDN PCQOQL.
 6. Кочорова Л.В., Потапчук А.А., Афанасьева В.В. Краткая история университетских клиник в России и в мире // *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова*. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 26-30. [Kochorova L.V., Potapchuk A.A., Afanasyeva V.V. A brief history of university clinics in Russia and in the world // *Scientific notes of St. Petersburg State Medical University named after. acad. I.P. Pavlova*. – 2018. – Vol. 25, No 4. – P. 26-30.] – DOI 10.24884/1607-4181-2018-25-4-26-30. – EDN DTYGLY.
 7. Бушуева Л. «Профессора должны были приложить немало усилий и труда по устройству клиник» (Создание новых университетских клиник Казанского университета в конце XIX в.) // *Эхо веков*. – 2012. – № 1-2. – С. 226-236. [Bushueva L. «Professors had to put a lot of effort and labor into setting up clinics» (Creation of new university clinics at Kazan University at the end of the 19th century) // *Echo of centuries*. – 2012. – No. 1-2. – P. 226-236.] – EDN PICLSZ.
 8. Созинов А. С. К, Менделевич Д. М. 100-летию юбилею клиники душевных болезней Императорского Казанского университета // *Казанский медицинский журнал*. – 2014. – Т. 95, № 4. – С. 597-601. [Sozinov A. S. K, Mendeleevich D. M. 100th anniversary of the Clinic of Mental Illnesses of the Imperial Kazan University // *Kazan Medical Journal*. – 2014. – Vol. 95, No 4. – P. 597-601.] – EDN SILBDN.
 9. Карелина М. А. Особенности возникновения и типологии лечебниц для душевнобольных в 19 веке, на примере США, Франции и Великобритании // *Архитектура и современные информационные технологии*. – 2016. – № 1(34). – С. 10. [Karelina M. A. Features of the emergence and typology of hospitals for the mentally ill in the 19th century, using the example of the USA, France and Great Britain // *Architecture and modern information technologies*. – 2016. – No. 1(34). – P. 10.] – EDN VLOEIL.
 10. Залесов В. Г. Архитектура комплекса зданий больницы для душевнобольных в Томске в начале XX века // *Архитектон: известия вузов*. – 2015. – № 3(51). – С. 16. [Zalesov V. G. Architecture of a complex of buildings of a hospital for the mentally ill in Tomsk at the beginning of the 20th century // *Architect: news of universities*. – 2015. – No. 3(51). – P. 16.] – EDN UJWCCJ.
 11. Dalia Ali Rafeeq, Faris Ali Mustafa. Evidence-based design: The role of inpatient typology in creating healing environment, hospitals in Erbil city as a case study// *Ain Shams Engineering Journal* 12 (2021) 1073–1087.– <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.06.014>
 12. Alshawaf R., Krasnobaev I. Standards for achieving a comfortable design for the Alzheimer's patients pathways // *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года*. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 1025. – DOI 10.1051/e3sconf/202127401025. – EDN TQLNOI.
 13. Cemre Cubukcuoglu, Pirouz Nourian, I. Sevil Sariyildiz, M. Fatih Tasgetiren. Optimal Design of new Hospitals: A Computational Workflow for Stacking, Zoning, and Routing// *Automation in Construction* 134 (2022) 104102.– <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104102>

14. Nata'lia Ransolin, Tarcisio Abreu Saurin, Robyn Clay-Williams, Carlos Torres Formoso, Frances Rapport. A knowledge framework for the design of built environment supportive of resilient internal logistics in hospitals// *Applied Ergonomics* 116 (2024) 104209.– <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104209>
15. Cemre Cubukcuoglu, Pirouz Nourian, M. Fatih Tasgetiren, I. Sevil Sariyildiz, Shervin Azadi. Hospital layout design renovation as a Quadratic Assignment Problem with geodesic distances// *Journal of Building Engineering* 44 (2021) 102952. – <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102952>
16. Smolova, M., Smolova D. Emergency architecture. Modular construction of healthcare facilities as a response to pandemic outbreak// *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April, 21–28, 2021. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 1013. – DOI 10.1051/e3sconf/202127401013. – EDN REEBVG.*
17. Закиева Л. Ф. Отечественный и зарубежный опыт территориального размещения и функционирования лечебно-профилактических учреждений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 42-51. – [Zakieva L. F. Domestic and foreign experience of territorial placement and functioning of medical institutions // *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. – 2022. – No. 3. – P. 42-51.*] DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-3-42-51. – EDN НВРНКВ.
18. Степанчук А. В., Галикиева Р. И., Семенова У. Н., Шайхуллина А. М. Проектирование гериатрического центра в Советском районе города Казань// *Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. – 2023. – № 2(2). – С. 139-150.* [Stepanchuk A.V., Galikieva R.I., Semenova U.N., Shaikhullina A.M. Design of a geriatric center in Sovetsky district of Kazan // *Architecture. Restoration. Design. Urbanism. – 2023. – No. 2(2). – P. 139-150.*] – EDN SEFEBO.
19. Хайруллина А.Т., Васильева Ю.В. Из истории строительства в Казани первого окружного дома для умалишенных // *Искусство и художественное образование в контексте межкультурного взаимодействия : Материалы VII Международной научно-практической конференции, Казань, 12 октября 2018 года / Под редакцией З.М. Явгильдино. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2018. – С. 177-184.* [Khairullina A. T., Vasilyeva Yu. V. From the history of the construction of the first district home for the insane in Kazan // *Art and art education in the context of intercultural interaction: Materials of the VII International Scientific and Practical Conference, Kazan, October 12, 2018 / Edited by Z .M. Yavgildino. – Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University, 2018. – P. 177-184.*] – EDN YYVYLL.
20. Надырова Х. Г., Хайруллина А.Т. Особенности размещения больничных комплексов в планировочной структуре Казани конца XVIII – начала XX вв // *Архитектура и строительство России. – 2022. – № 2(242). – С. 60-65.* [Nadyrova Kh.G., Khairullina A.T. Features of the placement of hospital complexes in the planning structure of Kazan at the end of the 18th – beginning of the 20th centuries // *Architecture and Construction of Russia. – 2022. – No. 2(242). – P. 60-65.*]– EDN UFLARF.
21. Осипов В.П. К открытию клиники душевных болезней Императорского Казанского Университета *Неврологический вестник Том XXI, № 3 (1914) – С. 763-810* [Osipov V.P. Towards the opening of the clinic of mental diseases of the Imperial Kazan University *Neurological Bulletin Vol. XXI, No. 3 (1914) – P. 763-810*].
22. Hostetter H., Naser M.Z. Architectural and structural engineering of nineteenth-and twentieth-century mental health institutions and psychiatric hospitals with respect to fire causes and mitigation strategies // *Journal of Architectural Engineering Technology, 2023, 29 (4).* DOI:10.1061/JAEIED.AEENG-1643
23. Cross S., Jewkes Y. The Architecture of Psychiatry and the Architecture of Incarceration // *Mental Health, 2018, pp. 49-72.* DOI:10.1007/978-3-319-94090-8_3.
24. Simonsen T.P., Brown S.D., Reavey P. Vitality and nature in psychiatric spaces: Challenges and prospects for ‘healing architecture’ in the design of inpatient mental

health environments // Health & Place. Volume 85, January 2024, 103169. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2023.103169>

Информация об авторах

Надырова Ханифа Габидулловна, доктор архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: nadyrova-kh@yandex.ru

Хайруллина Альбина Тагировна, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: steffanili@mail.ru

Information about the authors

Hanifa G. Nadyrova, doctor of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: nadyrova-kh@yandex.ru

Albina T. Khairullina, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: steffanili@mail.ru

УДК: 72.03
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.18
EDN: XMQECN



Творчество видных казанских архитекторов в послевоенный период (1946-50 гг.) в контексте национально-региональных традиций

М.А. Киносьян¹, Н.С. Киносьян¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Изучение творчества видных казанских архитекторов советского периода помогает понять общероссийские и региональные процессы формирования советской архитектуры. Послевоенный период становления казанской архитектурной школы остается наиболее малоизученным. В широком смысле *актуальность* настоящего исследования связана с необходимостью создания профессиональной региональной научной базы для формирования современной архитектуры Республики Татарстан, обладающей чертами культурной идентичности. Целью исследования является систематизация конкурсных проектов и определение методики проектирования видных советских архитекторов Казани в послевоенный период. Задачи исследования: выявить и ввести в научный оборот архивные источники по теме исследования; изучить библиографические источники по использованию архитекторами национально-региональных традиций в советскую эпоху; проанализировать методику проектирования казанских архитекторов в контексте национально-региональных традиций.

Результат. В результате проведенного исследования выявлены, систематизированы и введены в научный оборот архивные материалы, представленные на конкурс колхозных клубов, правлений, жилых домов и малых архитектурных форм видными казанскими архитекторами А.Г. Бикчентаевым, Н.П. Козловым, М.К. Игламовым, Д.М. Федоровым, П.А. Саначиным и др. Определены профессиональные задачи послевоенного времени, проанализирована методика проектирования.

Выводы. Творческий метод советских архитекторов Казани в послевоенный период основывался на уникальном синтезе регионального наследия и приемах существующего классицистического архитектурно-художественного стиля.

Плеядой видных архитекторов Казани сформированы основы научного исследования региональных традиций и выведены приемы их использования в архитектуре массового послевоенного строительства на территории ТАССР.

Зодчими Казани разработана уникальная орнаментальная система своего времени, которая является достоянием архитектурной культуры Татарстана.

Ключевые слова: национально-региональные традиции, конкурсные проекты, казанские архитекторы советского периода, методика проектирования, орнаментальные комплексы, идентичность

Для цитирования: Киносьян М.А., Киносьян Н.С. Творчество видных казанских архитекторов в послевоенный период (1946-50 гг.) в контексте национально-региональных традиций // Известия КГАСУ, 2024, № 1 (67), с. 182-192, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.18, EDN: XMQECN

Creativity of prominent Kazan architects in the post-war period (1946-50) in the context of national and regional traditions

N.S. Kinosyan¹, M.A. Kinosyan¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Studying the work of prominent Kazan architects of the Soviet period helps to understand the all-Russian and regional processes of formation of Soviet architecture. The post-war period of the formation of the Kazan architectural school remains poorly studied. In a broad sense, the relevance of this study is related to the need to create a professional regional scientific base for the formation of modern architecture of the Republic of Tatarstan, which has features of cultural identity. The purpose of the study is to systematize competitive projects and determine the design methodology of prominent Soviet architects of Kazan in the post-war period. The research objectives are to identify and introduce archival sources on the research topic into scientific circulation; to study bibliographic sources on the use of national and regional traditions in the Soviet era; to analyze the design methodology of Kazan architects in the context of national and regional traditions.

Result. As a result of the conducted research, archival materials submitted to the competition of collective farm clubs, managing boards, residential buildings and small architectural forms by prominent Kazan architects A.G. Bikchentaev, N.P. Kozlov, M.K. Iglamov, D.M. Fedorov, P.A. Sanachin and others were identified, systematized and introduced into scientific circulation. The professional tasks of the post-war period are defined, the design methodology is analyzed.

Conclusions. The creative method of the Soviet architects of Kazan in the post-war period was based on the unique synthesis of regional heritage and techniques of the existing classical architectural and artistic style.

The pleiad of prominent architects of Kazan formed the foundations of scientific research of regional traditions and derived techniques for their use in the architecture of mass post-war construction in the territory of the Republic of Tatarstan.

The architects of Kazan developed a unique ornamental system of their time, which is the heritage of the architectural culture of Tatarstan.

Keywords: national and regional traditions, competitive projects, Kazan architects of the Soviet period, design methodology, ornamental complexes, identity

For citation: Kinosyan N.S., Kinosyan M.A. Creativity of prominent Kazan architects in the post-war period (1946-50) in the context of national and regional traditions // News KSUAE, 2024, № 1 (67), p. 182-192, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.18, EDN: XMQECN

1. Введение

Проявление тенденций глобализации в современной архитектурной практике XXI века возвращает профессиональное сообщество архитекторов к изучению и переосмыслению культурных исторических традиций [1,2].

В декабре 2023 года темой Международного архитектурно-строительного форума «Казаньш» в столице Татарстана стало «Отражение идентичности» как отражение многослойного облика уникальных культурных, историко-географических и архитектурных особенностей региона в частности и вектора развития архитектуры городов в целом. В этой связи повышается значимость произведений архитектуры советского периода 1930–50-х годов, когда архитектура интенсивно развивалась в направлении поиска национально-региональных форм.

Творческий метод советских архитекторов 1930-50-х гг. формировался в рамках направления соцреализма. Идеология общества в данный исторический период предъявляли к архитекторам особые требования – сформировать пространство, насыщенное культурным и одновременно идеологическим содержанием.

Великая Отечественная война определила другие задачи и практически полностью переключила архитекторов страны на вопросы, связанные с восстановительным строительством. Это был новый опыт, когда придерживаясь сложившейся идеологии общества и работая в рамках того же архитектурно-художественного стиля, архитекторам приходилось строить быстро, качественно и предельно рационально. Жесткий дефицит средств и времени заставил по-новому взглянуть и на использование традиционных строительных материалов, а также создавать новые материалы на базе местного сырья [3].

Часто здания возводились с использованием конструкций, издавна применявшихся народной архитектурой. В методических указаниях по планировке и благоустройству в условиях восстановительного строительства обозначалось, что архитектура жилых домов и объектов инфраструктуры должна была быть простой, конструктивно несложной, но выразительной. Вполне уместно устройство архитектурных деталей в виде карнизов, наличников, резьбы и росписи. При создании архитектурного образа должны быть учтены многовековые народные традиции и запросы колхозных семей [4].

Перед зодчими Казани в данный исторический период стояли следующие задачи – исследование народной архитектуры и декоративно-прикладного искусства региона и внедрение архитектурных традиций в массовое восстановительное строительство на территории ТАССР.

Научными исследованиями народной архитектуры казанских татар, архитектурно-строительными типами, вопросами становления, синтеза и взаимовлияния национальных культур на территории Татарстана занимались ученые: Айдаров С.С., Айдарова Г.Н. [5-7],

Натурными обследованиями, обмерами деревянной архитектуры региона занимались сами практикующие казанские архитекторы, чьи проекты неоднократно были представлены на конкурсы колхозных клубов, правлений, жилых домов и малых архитектурных форм: А.Г. Бикчентаев, И.Г. Гайнутдинов [8], Н.П. Козлов, М.К. Игламов, Д.М. Федоров, П.А. и др.

Научные исследования советских ученых Мартынова Г. М., Князева К.Ф. [4] посвящены планировке и благоустройству сельской местности в условиях поэтапного восстановительного послевоенного строительства в СССР.

Вопросы становления и развития казанской архитектурной школы советского периода в разное время рассматривали Закирова Т.Р. [9], Киносьян Н.С. [10,11], Саначин С.П. [12].

Развитию декоративно-прикладного искусства региона, историческому формообразованию и орнаментальным комплексам Среднего Поволжья посвящены труды Альменовой-Халит Н.Н. [13], Валеева Ф.Х. [14], Халитова Н.Х. [15].

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью творческих персоналий казанской архитектурной школы, их проектной деятельности в послевоенный период.

В широком смысле, актуальность исследования связана с необходимостью создания профессиональной региональной научной базы для формирования современной архитектуры Республики Татарстан, обладающей чертами культурной идентичности.

Целью исследования является систематизация конкурсных проектов и определение методики проектирования видных советских архитекторов Казани в послевоенный период.

Задачи исследования:

- выявить и ввести в научный оборот архивные источники по теме исследования;
- изучить библиографические источники по использованию национально-региональных традиций в советскую эпоху;
- проанализировать методику проектирования казанских архитекторов в контексте национально-региональных традиций.

2. Материалы и методы

Первичными материалами являются архивные источники по теме исследования. Их выявление, систематизация и анализ позволили составить авторские таблицы по премиальному ранжированию проектов колхозных клубов, правлений, жилых домов и малых архитектурных форм видных казанских архитекторов: А.Г. Бикчентаева, Н.П. Козлова, М.К. Игламова, Д.М. Федорова, П.А. Саначина и др.

Вторичными материалами исследования являются библиографические источники, позволяющие проследить общие архитектурно-идеологические процессы послевоенного времени и определить методику проектирования в рамках региональных запросов.

3. Результаты и обсуждение

Послевоенный период проектирования и строительства в Советской Татарии (1946–1950гг.) характеризовался обеспечением населения недорогим рациональным жильем и объектами обслуживания. Но даже в таких непростых экономических условиях проектирования, архитекторы ставили перед собой высокохудожественные задачи.

В данный период плеядой казанских архитекторов (А.Г. Бикчентаевым, Н.П. Козловым, М.К. Игламовым, Д.М. Федоровым, П.А. Саначиным и др.) разрабатывались профессиональные проекты согласно требованиям нового времени и нового советского стиля.

В региональных условиях новый стиль советской архитектуры характеризовался как национальный по форме и социалистический по содержанию и основывался на применении комплексов национального растительного орнамента, который использовался фрагментарно и служил акцентом в композиционно ответственных частях фасада [6].

На рис. 1 представлены конкурсные работы архитекторов Федорова Д.М. (правление колхоза) и Саначина П.А. (жилой дом), удостоенные первой премией. Мастерами предложены варианты в дереве и в камне (в традиционных строительных материалах региона).

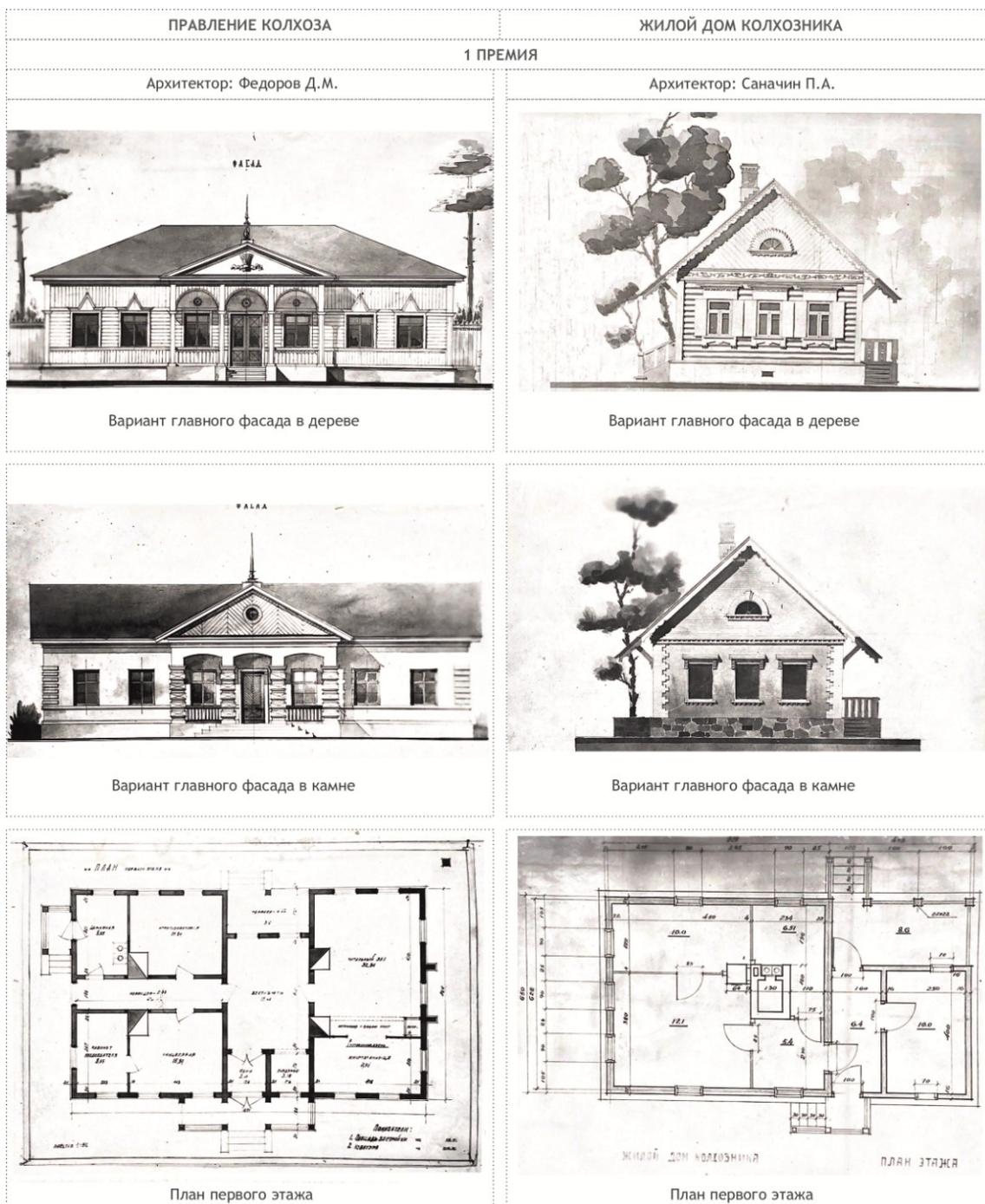


Рис.1. Конкурс на правление колхоза и жилой дом колхозника (1 премия) (иллюстрация авторов, разработана на основе архивных источников [16])

Fig.1. Competition for the managing board of the collective farm and the collective farmer's house (1 prize) (illustration by the authors, developed on the basis of archival sources [16])

На рис. 1 представлены конкурсные работы архитекторов Федорова Д.М. (правление колхоза) и Саначина П.А. (жилой дом), удостоенные первой премией. Мастерами предложены варианты в дереве и в камне (в традиционных строительных материалах региона).

Основу творческой методики казанских архитекторов формировали следующие моменты:

Для жилых домов:

– обращение к композиционно-пространственному построению традиционной татарской усадьбы – наличие симметрии; трех окон на главном фасаде дома,

обращенным на улицу; авторского декора наличников; отсутствие ставней; главным акцентом являлся обильно декорируемый треугольный фронтон.

– обращение к традиционным планировочным принципам (деление на функциональные части с коммуникационным транзитным пространством);

– работа с региональными строительными материалами (дерево, камень).

Для правления:

– работа с объемом на основе классицистического формообразования, наличие развитой входной группы, наиболее декорированной и имеющей три входных полуциркульных арочных проема;

– декор фронтона, наличников оконных проемов, угловых частей здания;

– обращение к традиционным планировочным принципам (деление на функциональные части с коммуникационным транзитным пространством);

– работа с региональными строительными материалами (дерево, камень).

На рис. 2 представлены конкурсные работы архитекторов Бикчентаева А.Г., Козлова Н.П. (1 премия) и Игламова М.К. (2 премия) по разработке колхозного клуба. Мастерами предложены варианты в дереве и в камне.

Основу творческой методики формировали следующие моменты:

– на основе классицистического формообразования объекта, выраженного наличием объема правильной формы, выверенных пропорций, прямоугольной планировочной структурой, наличием акцентных колонн на главном фасаде здания, – в композиционно ответственные части (капители, наличники проемов, междуэтажные простенки, карнизы) вводится модернизированный региональный орнамент;

– для работы с вариантами в дереве активно применялась методика резьбы по дереву и инкрустация по деревянной стене на главном фасаде.

На рис. 3 представлены и ранжированы по премиям конкурсные работы по МАФ (киоски, павильоны) архитекторов Бикчентаева А.Г., Федорова Д.М., Дроздова В.П., Любимова А.А. Общими методологическими приемами являются:

– работа с классицистическими образцами и пропорциями;

– инкрустация поверхности геометрическим орнаментом (соты, многоугольники);

– фрагментарное использование растительных региональных орнаментов, как правило, в рамках ленточных и букетных композиций.

На рис. 4 представлены и ранжированы по премиям конкурсные работы казанских архитекторов по архитектурно-художественным ограждениям:

– садовые ограждения (Солдатов Г.И. – первая и третья премии, Алпаров У.Г. – вторая премия, Бикчентаев А.Г. – поощрительная премия);

– ограждения для протока Булак (Сперанский Л.Т. – первая премия, Игламов М.К. – вторая премия, Матвеева Д.И. – третья премия, Фомина А.И. – поощрительная премия);

– ограждения для газонов (Бикчентаев А.Г. – первая премия, Любимов А.А. – вторая премия, Матвеева Д.И. – третья премия, Любимов А.А. – поощрительная премия).

В работах наблюдается творческий поиск в направлении переработки региональных исторически сложившихся орнаментальных комплексов. Архитекторами используются мотивы набегающей волны, мотивы трилистника, растительных листьев, сердцевидные мотивы, отсылающие ко 2-му и 3-му орнаментальному комплексу [14]. Часто используются циркульные и полуциркульные направляющие, отличающиеся незаконченностью образного решения.

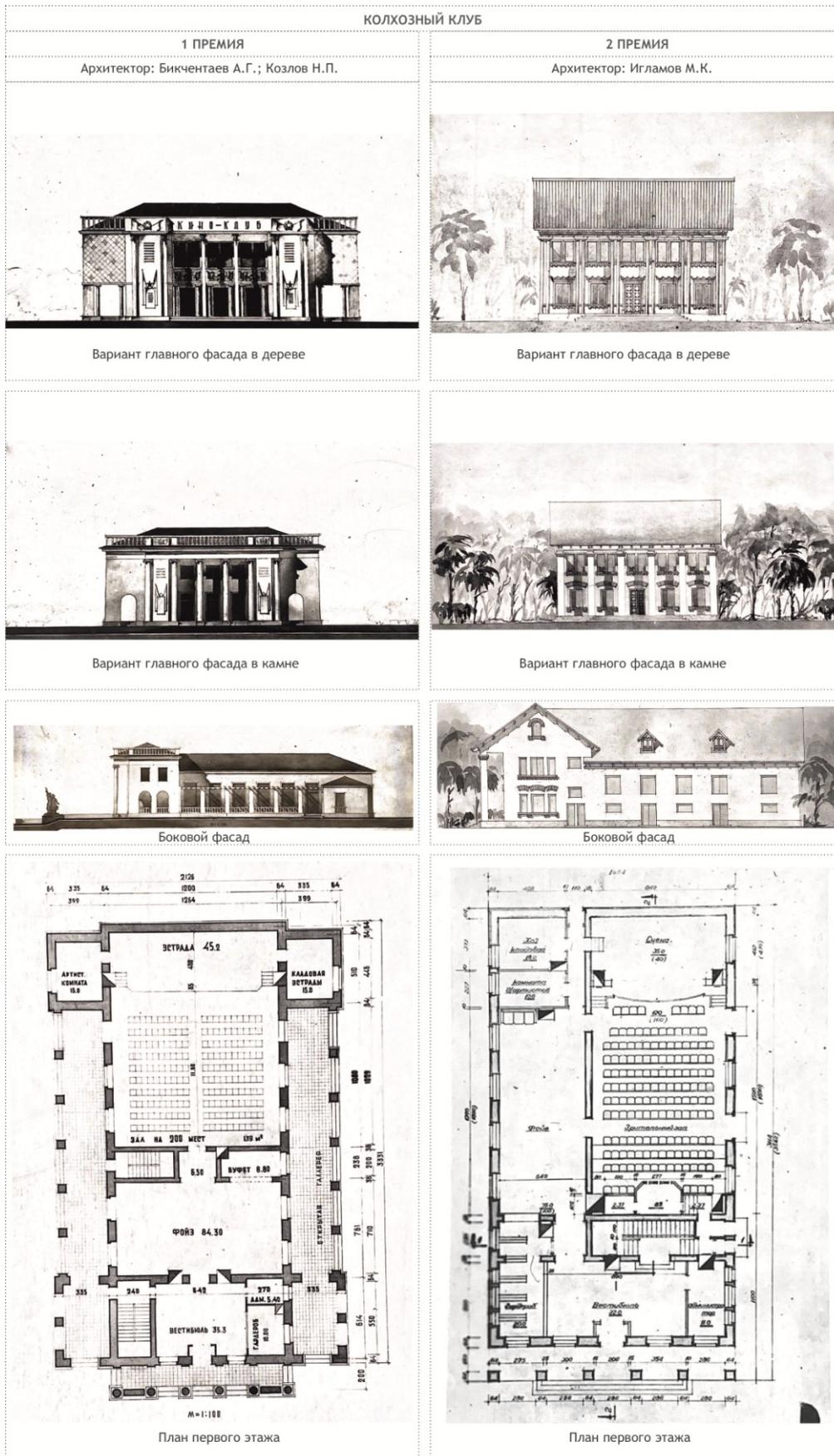


Рис.2 Конкурс на проектирование колхозного клуба (1,2 премии) (иллюстрация авторов, разработана на основе архивных источников [16])

Fig.2 Competition for the design of the collective farm club (1,2 prizes) (illustration by the authors, developed on the basis of archival sources [16])

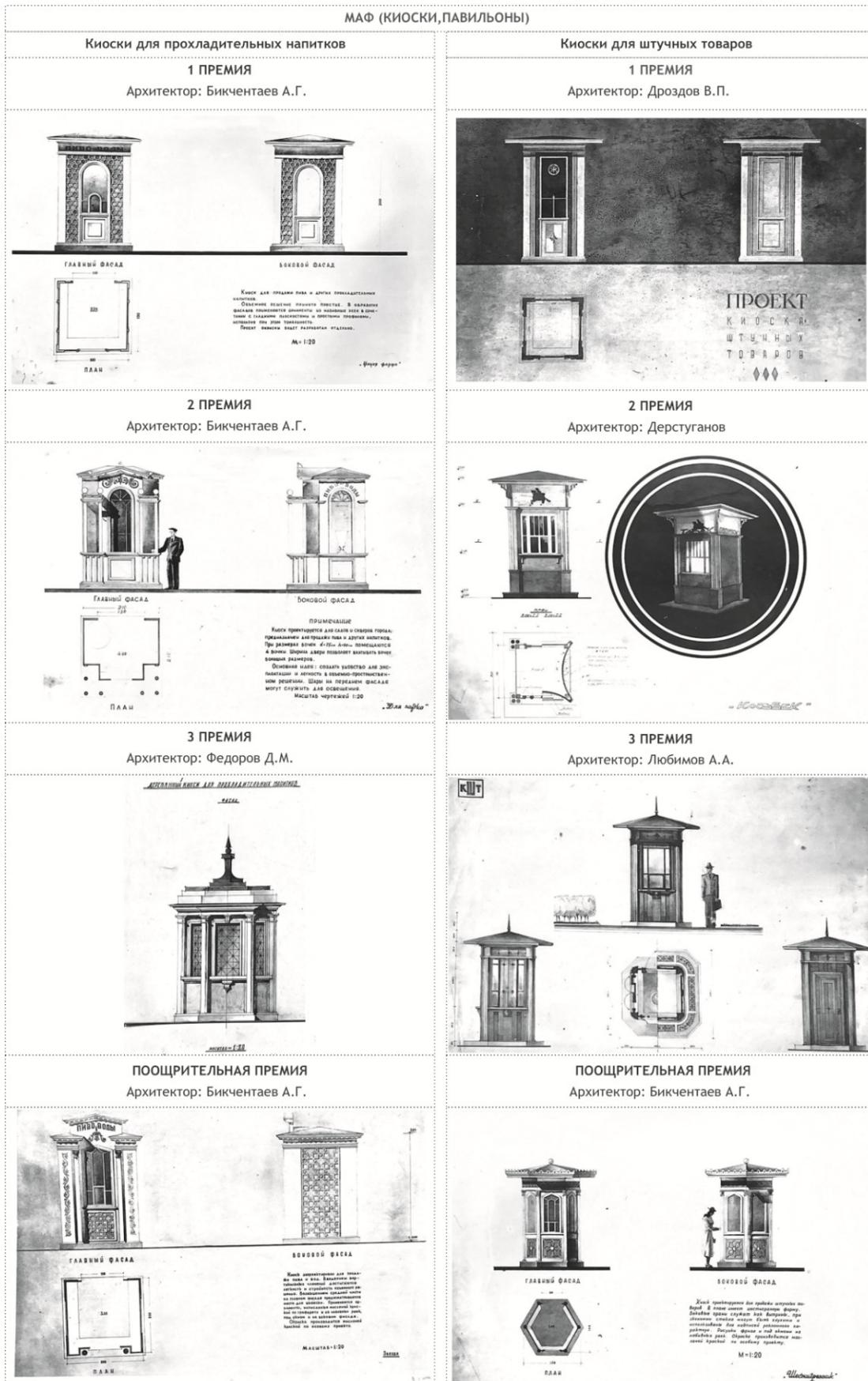


Рис.3 Конкурс на проектирование киосков, павильонов (иллюстрация авторов, разработана на основе архивных источников [16])
 Fig.3 Competition for the design of kiosks and pavilions (illustration by the authors, developed on the basis of archival sources [16])

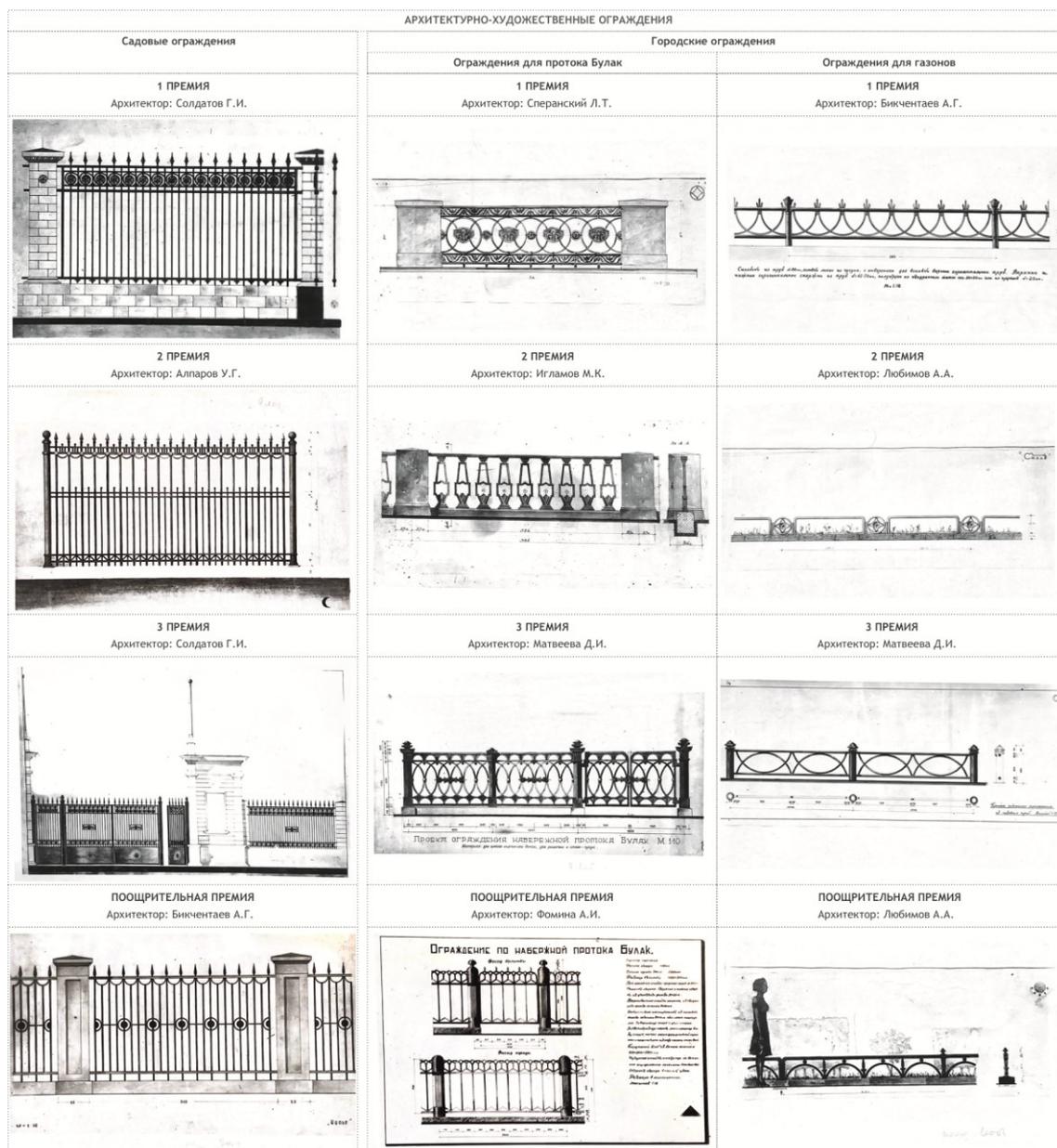


Рис.4 Конкурс на проектирование архитектурно-художественных ограждений (иллюстрация авторов, разработана на основе архивных источников [16])
 Fig.4 Competition for the design of architectural and artistic fences (illustration by the authors, developed on the basis of archival sources [16])

Казанские зодчие понимали традиции, как систему национально-региональных и социальных понятий, находившиеся в постоянном изменении и обогащении, и видели новаторство – в развитии духовной стороны архитектуры.

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- Творческий метод советских архитекторов Казани в послевоенный период основывался на уникальном синтезе регионального наследия и приемах существующего советского неоклассического архитектурно-художественного стиля.
- Плеядой видных архитекторов Казани сформированы основы научного исследования региональных традиций и выведены приемы их использования в архитектуре массового послевоенного строительства на территории ТАССР:

- введение в композиционно ответственные части фасадов зданий и малых архитектурных форм авторского декора, основанного на исторических орнаментальных комплексах;
 - обращение к региональным планировочным принципам архитектуры;
 - обращение к региональным строительным материалам (дерево, камень).
- Зодчими Казани разработана уникальная орнаментальная система своего времени, которая является достоянием архитектурной культуры Татарстана.

Список литературы/ References

1. A Lyapin. The influence of regional traditions on the use of wood in works of contemporary American architects/ IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 751 (2021) 012091. DOI:10.1088/1755-1315/751/1/012091
2. Ya Li & Sahari. The application of regional culture in urban public space design / Cogent Arts & Humanities (2022), 9; 2116773, DOI 10/1080/23311983.2022.2116773
3. Косенкова Ю. Л. Советский город 1940-х –первой половины 1950-х годов / Ю. Л. Косенкова. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 409 с.[Kosenkova Y. L. The Soviet city of the 1940s - the first half of the 1950s / Y. L. Kosenkova. – М. : Book House "LIBROCOM", 2008. – 409 p.]
4. Мартынов, Г. М. Князев К.Ф. Планировка и благоустройство села / Г. М. Мартынов – М.: Издательство Академии Архитектуры СССР, 1945. – 127 с. [Martynov, G. M. Knyazev K.F. Village planning and landscaping / G. M. Martynov – М.: Publishing House of the Academy of Architecture of the USSR, 1945. – 127 p.]
5. Айдарова-Волкова, Г. Н. Модель-концепция архитектурной культуры региона: матрица архитектурно-строительных типов, традиции, влияния (на примере Республики Татарстан) // Архитектура и строительство России. – 2021 – № 4 (240) – С. 8-13. [Aidarova-Volkova, G. N. Model-concept of the architectural culture of the region: a matrix of architectural and construction types, traditions, influence (on the example of the Republic of Tatarstan) // Architecture and Construction of Russia. – 2021 – No. 4 (240) – P. 8-13.]
6. Айдарова-Волкова, Г. Н. Архитектурная культура Среднего Поволжья XVI-XIX веков / Г. Н. Айдарова-Волкова. – Казань: КГАСА, 2005. – 196 с. [Aidarova-Volkova, G. N. Architectural culture of the Middle Volga region of the XVI-XIX centuries / G. N. Aidarova-Volkova. – Kazan: KGASA, 2005. – 196 p.]
7. Айдарова, Г. Н. Деревянные жилые кварталы Казани. Старотатарская слобода. История и современность // Жилищное строительство. – 2018 – № 12 . – С.45-49. [Aidarova, G. N. Wooden residential quarters of Kazan. Starotatarskaya sloboda. History and modernity // Housing construction. – 2018 – No. 12. – P.45-49.]
8. Отдел рукописей и редких книг научной библиотеки им. Н.И. Лобачевского КФУ. Деревянное зодчество казанских татар, 1960 г. // арх. фонд № 20. арх. ед. 31. 60 л. [Department of Manuscripts and Rare Books of the N.I. Lobachevsky Scientific Library of the KFU. Wooden architecture of the Kazan Tatars, 1960. // arc. fund № 20. arc. un. 31. 60 p.]
9. Закирова, Т.Р. Архитектурно-художественная жизнь Казани конца 1960-х –1980-х годов, поиски образной выразительности и национального своеобразия в архитектуре общественных зданий города // Архитектон: известия вузов. – 2023 – №1(81). – С. 1-10. [Zakirova, T.R. Architectural and artistic life of Kazan in the late 1960s –1980s, the search for figurative expressiveness and national identity in the architecture of public buildings of the city // Architecton: izvestiya vuzov. – 2023 – No.1(81). – P. 1-10.]
10. Киносьян, Н.С. Архитектор Исмагил Галеевич Гайнутдинов: Монография / Н.С. Киносьян.– Казань: Изд-во Казанск. гос.ахитект.-строит. ун-та, 2020. – 168 с. [Kinosian, N.S. Architect Ismagil Galeevich Gainutdinov: Monograph / N.S. Kinosian.– Kazan: Publishing House of Kazan State University of Architecture and Engineering, 2020. - 168 p.]

11. Elza Bashirova., Natalia Kinosyan. The architecture of spectacular buildings in the city of Kazan in the context of national and regional traditions // 3S Web of Conferences 274, 01016 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127401016> STCCCE – 2021.
12. Саначин, С. П. Экскурс в архитектурную жизнь советской Казани / С. П. Саначин. – Казань: Фолиант, 2014. – 240 с. [Sanachin, S. P. An excursion into the architectural life of Soviet Kazan / S. P. Sanachin. – Kazan: Folio, 2014. – 240 p.]
13. Альменова-Халит, Н.Н. Татарский архитектурный орнамент: альбом-монография / Наиля Альменова-Халит. – Казань: Татар.кн.изд-во, 2017. – 175с. [Almenova-Halit, N.N. Tatar architectural ornament: monograph album / Naila Almenova-Halit. – Kazan: Tatar Publishing house, 2017. – 175 p.]
14. Валеев, Ф. Х. Орнамент казанских татар / Ф. Х. Валеев. – Казань: Татарское книжное издательство, 1969. – 201 с. [Valeev, F. H. The ornament of the Kazan Tatars / F. H. Valeev. – Kazan: Tatar Book Publishing House, 1969. – 201 p.]
15. Халитов, Н.Х. Стили и формы татарской архитектуры Казани 1920-х – начала 1960-х гг.: историко-архитектурное исследование: монография / Нияз Халит, Наиля Альменова-Халит. – Казань: Татар.кн.изд-во, 2016. – 247с. [Khalitov, N.H. Styles and forms of Tatar architecture in Kazan in the 1920s – early 1960.: historical and architectural research: monograph / Niyaz Halit, Naila Almenova-Halit. – Kazan: Tatar Publishing house, 2016. – 247 p.]
16. Фонд архива союза архитекторов РТ / конкурсные проекты Татарского отделения Союза советских архитекторов СССР. [Archive Fund of the Union of Architects of the Republic of Tatarstan / competitive projects of the Tatar branch of the Union of Soviet Architects of the USSR]

Информация об авторах

Киносьян Наталья Станиславовна, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: kinosa@mail.ru

Киносьян Максим Андреевич, преподаватель дополнительного образования, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: max458@mail.ru

Information about the authors

Natalia S. Kinosyan., candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: kinosa@mail.ru

Maxim A. Kinosyan., teacher of additional education, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: max458@mail.ru

УДК: 711.1
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.19
EDN: YUELYP



Развитие рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани и повышение ее туристической привлекательности

М.Ш. Фазлеев¹, Р.Н. Дияров¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: Парк им. Петрова – один из старейших парков города Казани, расположенный на границе бывшей Пороховой слободы. Несмотря на высокую мемориальную и историческую ценность, на сегодняшний день территория нуждается в развитии. На территории парка Петрова необходимо создать комфортную и функциональную туристско-рекреационную среду для комфортного пользования. Гости и жители города смогут ближе познакомиться с историей выдающегося предприятия, воспитать в себе и своих детях чувство гордости и патриотизма. Цель исследования – развитие туристско-рекреационной среды на территории Парка Петрова г. Казани для включения в существующую туристическую среду города, создание комфортной благоприятной среды для гостей и жителей города.

Результаты. На основе существующего состояния и рекреационного потенциала территории, выполненных натурных исследований, выявленных принципов реконструкции мемориальных парков, анализа литературы и иконографии, разработана концепция благоустройства и повышения туристической привлекательности рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани. В соответствии с исследованием была разработана схема генерального плана территории, а также видовые кадры.

Выводы. 1. Территория парка Петрова обладает значительным потенциалом для развития. 2. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта в проектировании мемориальных парков выявлены принципы реконструкции мемориальных парков. Мемориальные парки должны играть просветительскую роль, повествовать историю места за счет своего наполнения, а также отвечать требованиям современного использования.

3. Разработанная концепция благоустройства включает в себя мемориальные объекты, отвечает выявленным принципам реконструкции мемориальных парков, а также соответствует стандартам современного использования. Благодаря формированию туристического маршрута, включающего мемориальный парк и ближайшие исторические объекты, парк Петрова будет включен в туристическую систему города.

Ключевые слова: парк, рекреационная среда, благоустройство, туристическая привлекательность

Для цитирования: Фазлеев М. Ш., Дияров Р. Н. Развитие рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани и повышение ее туристической привлекательности // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.193-206, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.19, EDN: YUELYP

Development of the recreational environment on the territory of the park named after Petrova of Kazan and increasing its tourist attractiveness

M.Sh. Fazleev¹, R.N. Diyarov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: The Park named after Petrov is one of the oldest parks in the city of Kazan, located on the border of the former Porokhovaya Sloboda district. Despite its high memorial and historical value, today the territory is in need of development. On the territory of Petrov Park it is necessary to create a comfortable and functional tourist and recreational environment for comfortable use. Guests and residents of the city will be able to get closer to the history of the outstanding enterprise, cultivate in themselves and their children a feeling of pride and patriotism. The purpose of the study is to develop tourist and recreational environment on the territory of Petrov Park in Kazan for its inclusion into the existing tourist environment of the city, creating a comfortable favorable environment for guests and residents of the city.

Results. Based on the existing condition and recreational potential of the territory, field studies performed, identified principles for the reconstruction of memorial parks, analysis of sources and iconography, a concept for improving and increasing the tourist attractiveness of the recreational environment on the territory of the Petrov park of Kazan was developed. In accordance with the study, a master plan of the territory was developed, as well as views.

Conclusions. 1. The territory of Petrov Park has significant potential for development.

2. Based on the analysis of domestic and foreign experience in the design of memorial parks, the principles of reconstruction of memorial parks have been identified. Memorial parks should play an educational role, tell the history of the place through their content, and also meet the requirements of modern use.

3. The developed concept of improvement includes memorial objects, meets the identified principles of reconstruction of memorial parks, and also meets the standards of modern use. Thanks to the formation of a tourist route, including the memorial park and nearby historical sites, Petrov Park will be included in the city's tourist system.

Key words: park, recreational environment, landscaping, tourist attractiveness

For citation: Fazleev M. Sh., Diyarov R. N. Development of the recreational environment on the territory of the park named after Petrova of Kazan and increasing its tourist attractiveness // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.193-206, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.19, EDN: YUELYP

1. Введение

Парк им. Петрова расположенный в Кировском г. Казани районе является одним из старейших парков города. Ранее место, где располагается парк, являлось границей между городом и Пороховой слободой. На территории слободы располагались дома рабочих порохового завода. Для обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях дома были отделены от завода высаженной рощей деревьев. В 1917 году в результате взрыва снарядов на заводе произошел сильнейший пожар, в результате которого было разрушено, по меньшей мере, пять сотен зданий, включая здания самого завода. После оценки последствий катастрофы, было решено увеличить площадь разделительного буфера [1].

После взятия Казани Красной армией в 1918 году комитетом завода было решено переименовать площадь в честь революционера, пороховщика Романа Ефимовича Петрова [2]. В 1922 году, во время пожара на производстве, трагически погибает известный казанский архитектор, занимавший должность архитектора Казанского порохового завода, В.А. Трифионов. В 1935 году на месте площади был организован парк,

граничащий с Дворцом культуры имени десятилетия ТАССР. Проект Парка Петрова был выполнен студентом Ленинградского института инженеров коммунального строительства И.Д. Красотиным. Проект парка предусматривал установку фонтана в виде серпа и молота, статуи В.И. Ленина, размещение стадиона, детской и танцевальной площадок [3]. На сегодняшний день все эти элементы утрачены.

Вход в парк Петрова определяет памятник истории и культуры республиканского значения – Юбилейная арка «Красные ворота» 1888 года постройки, архитектор И.П. Котелов. Статус присвоен Постановлениями Кабинета Министров Республики Татарстан № 599, 601 [4]. Строительство арки на въезде в пороховой городок было приурочено к 100-летию основания порохового завода [5].

В 1988 году арка была реконструирована с восстановлением утраченных элементов. В том же 1988 году к 200-летию юбилею завода вдоль восточной границы парка была воздвигнута барельефная композиция «Зареченцам», скульптор М.А. Неймарк, архитектор В.П. Ломакин. Материалы – бетон, гранит, бронза. Скульптура выполнена в стиле социалистического реализма, посвящена героической работе зареченцев во время Великой Отечественной Войны [6].

В 2005 году, к 60-летию Великой Победы в парке была установлена модель системы реактивного залпового огня «Катюша» и установлена мемориальная стела в честь погибших на фронте жителей Кировского района [7].

В 2008 году во Дворце культуры имени десятилетия ТАССР произошел пожар, после которого здание не подлежало восстановлению и было снесено [8]. В этом же году была выполнена реконструкция парка: обновлена детская площадка, организованы клумбы. В связи с подготовкой к универсиаде 2013 года, площадь парка была сокращена, были построены спортивные объекты: крытая арена, футбольное поле. С течением времени парк постепенно терял популярность, изнашивались малые архитектурные формы, фонтан и детская площадка. В 2020 году в парке открылась аллея Славы в честь Героев Великой Отечественной Войны – работников порохового завода.

На сегодняшний день развитием парка занимается МБУ Институт Развития Города. Институтом готовится проект по переносу и оборудованию детских площадок. В модели развития территории предусматривается благоустройство территории существующей спортивной площадки, выполнение новых дорожек. В рамках данной работы было проведено совместное совещание с МБУ Институт Развития Города. В разрабатываемой концепции будут учтены рекомендации рабочей группы.

По данным администрации города, в Кировском районе проживает 145 тысяч человек. Количество жителей непрерывно увеличивается, что способствует введению в использование современных жилых комплексов и объектов социальной инфраструктуры: учебных заведений, медицинских учреждений, детских садов и домов культуры [9]. В непосредственной близости от парка Петрова в обозримом будущем готовятся к сдаче следующие жилые комплексы: ЖК «Элегия» на ул. Окольная; ЖК «Каштан» на ул. Маршрутной; ЖК «Статум» в Адмиралтейской слободе и многие другие. Для обеспечения комфортной жизни горожан необходимо наличие благоустроенных рекреационных зон для отдыха, прогулок с детьми, занятий спортом, проведения событийных мероприятий [10]. Эти функции могут и должны быть доступны на территории Парка Петрова.

Территория парка обладает уникальными особенностями и возможностями для развития. В первую очередь, это, упомянутая ранее, высокая мемориальная и историческая значимость. Важно отметить, что парк расположен вблизи со старым руслом реки Казанки, которое является потенциально значимым объектом для развития рекреационной территории Кировского района г. Казани.

На территории парка Петрова целесообразно развить комфортную и функциональную туристско-рекреационную среду, в целях соответствия исторической и мемориальной значимости, и для комфортного пользования жителями и гостями города. Помимо рекреационной функции, важно усилить мемориальную составляющую территории. Гости и жители города смогут ближе познакомиться с историей страны, города и выдающегося предприятия, узнать больше о Героях Отечества, воспитать в себе и своих детях чувство патриотизма.

При включении парка Петрова в туристическую структуру города, открывается возможность для окупаемости территории. Лавки с горячими и холодными напитками, уличной едой, мороженым, тематическими сувенирами Казанского порохового завода и Кировского района, прокаты сезонного спортивного инвентаря, – все это возможности для поддержания комфортной среды на территории парка и ухода за его благоустройством.

Цель работы: Развитие туристско-рекреационной среды на территории Парка Петрова г. Казани для включения в существующую туристическую среду города, создание комфортной благоприятной среды для гостей и жителей города.

Задачи работы:

1. Выявление предпосылок развития и анализ существующей рекреационной среды парка Петрова г. Казани
2. На основе анализа современного отечественного и зарубежного опыта в сфере развития рекреационной парковой среды выявление принципов реконструкции мемориальных парков.
3. Разработка концепции благоустройства парка имени Петрова г. Казани для развития рекреационной среды и повышения ее туристической привлекательности.

2. Материалы и методы

Географические предпосылки: расположение парка Петрова вблизи от въезда в г. Казань со стороны Горьковского шоссе, дает возможность для организации экскурсии по пути к центру города. С территории Парка Петрова открывается вид на старое русло реки Казанки и Зилантов Свято-Успенский монастырь, памятник регионального значения. В непосредственной близости парка находится Территория старого русла реки Казанки. Река обладает уникальным природно-рекреационным потенциалом, связь парка с ней крайне значима. Кроме того, вблизи располагаются следующие значимые территории и объекты: Адмиралтейская слобода, Мануфактура Алафузова и Алафузовский театр, Музей Порохового завода. Все эти объекты, вместе с территорией парка, могут быть объединены в единый туристический маршрут по Кировскому району г. Казани.

Вблизи парка ведется активная застройка, в обозримом будущем готовятся к сдаче следующие жилые комплексы: ЖК «Элегия» на ул. Окольная; ЖК «Каштан» на ул. Маршрутной; ЖК «Статус» в Адмиралтейской слободе и многие другие. Также парк имеет площадь 2,4 Га, что позволяет разместить на его территории все необходимые для посетителей функции.

Стоит отдельно отметить, что ландшафт парка достаточно озеленен и имеет ровный рельеф местности, что дает возможность формирования регулярной планировки и использования ее в зимнее время, к примеру, в качестве ледового катка (по главной аллее).

Социально-исторические предпосылки: парк Петрова обладает большой мемориальной и исторической ценностью, он отражает историю Казанского порохового завода, служит олицетворением достижений и побед нашей страны. Эти факторы являются основной для дальнейшего развития мемориальной и рекреационной составляющей территории.

В связи с активной застройкой Кировского района новым жильем, для комфортной жизни горожан необходимо наличие благоустроенных рекреационных зон для отдыха, прогулок с детьми, занятий спортом, проведения событийных мероприятий.

Экономические предпосылки: парк Петрова имеет потенциал для экономической окупаемости. На территории есть возможность размещения лавок с горячими и холодными напитками, уличной едой, мороженым, тематическими сувенирами порохового завода, Кировского района и города Казани, что является возможностью для возврата вложенных в территорию инвестиций. Экскурсии по парку и ближайшим значимым объектам и территориям, объединенным в единый туристический маршрут, также гарантируют экономическую выгоду.

Существующая рекреационная среда Парка Петрова г. Казани: на данный момент территория парка нуждается в развитии. В ходе натурного анализа проведена фотофиксация, а также выявлены следующие недостатки среды: детская площадка

размещена не в соответствии с нормативом и находится в охранной зоне газораспределительной подстанции; отсутствует детская площадка для детей дошкольного возраста; отсутствует специальное покрытие для спортивной площадки; отсутствует вход в парк с северной стороны (помеха в виде сплошного забора); отсутствует комфортный транзит через парк; на северо-востоке парка нет зебры для перехода через дорогу ул. Степана Халтурина; местами устаревшие малые архитектурные формы; устаревший, не работающий фонтан; нуждающаяся в завершении ландшафтная композиция; отсутствие благоустроенной площадки для событийных мероприятий; отсутствует доступная информация об истории парка; отсутствует туристическая навигация; отсутствуют уличные санитарные узлы.

Теоретической базой работы в области благоустройства и озеленения стало учебное пособие «Инженерное благоустройство и озеленение в условиях реконструкции городской среды» под авторством М.Ш. Фазлеева, Р.К. Мухитова. Учебное пособие рассматривает варианты решения различных проблем, связанных с благоустройством территорий.

В исследовании А. Параскевополо рассматривается вопрос того, могут ли исторические парки отвечать требованиям современного активного использования гостями и жителями города. Путем социологических опросов и анализа данных авторы приходят к мнению. При грамотном развитии территории исторические парки не только смогут отвечать требованиям современного использования, но и смогут эффективнее раскрывать свою историческую ценность [11].

В статье М.Г. Саркисьянц поднимается вопрос важности мемориальных парков в городской среде. Автор считает, что, являясь неотъемлемой частью жизни общества, парки возникли в соответствии с материальными и с духовными потребностями людей, стали одним из атрибутов современной цивилизации. Мемориальные парки стали средством идентификации конкретных мест и событий, сохраняя воспоминания о прошлом наших предков. Расположение мемориальных парков внутри городов превратило их в один из ключевых градообразующих элементов городской среды [12].

Статья Б.Г. Гагарина и М.Д. Тулбаевой посвящена проектированию мемориальных парков. Мемориальные парки играют важную воспитательную и просветительскую роль в жизни общества. Авторы приходят к мнению, что для достижения грамотной планировки данного типа парка важно учесть необходимость наличия в нем определенных функциональных зон, включающих в себя мемориальные объекты и культурно-просветительские сооружения. Авторы подчеркивают, что, как правило, на ровном рельефе местности используется регулярная планировка, которая последовательно будет раскрывать смысловое значение мемориальных объектов. В организации растительных групп также существуют особенности: различная флора несет разную смысловую нагрузку и посыл, как и скульптура. Важное значение имеет цвет, форма растений, особенно если речь идет о посадке цветущих растений. В статье приводится пример – концепция мемориального парка, спроектированного с учетом изложенных рекомендаций [13].

В статье А.Е. Енина и Т.И. Грошевой поднимается важный вопрос особенностей и закономерностей функционирования парков в исторической части города. Авторы приходят к мнению, что для правильного функционирования парк должен отвечать следующим критериям:

1) Стабильность посещения, обеспечить которую помогают различные сценарии развития и событийного наполнения озелененных пространств, различные декоративные элементы, дополнительное освещение, временные объекты, организация сезонных мероприятий. В утреннее время объектами притяжения в парках являются беговые дорожки и озелененные лужайки, в дневное время – детские площадки, а вечером – музыкальные сцены, амфитеатры, территории кофеен, веранды и т.п.

2) Функциональность: санитарная функция (создание комфортных климатических условий); коммуникационная функция, направленная на поддержание социальных контактов; эстетическая функция и т.д.

3) Полисоциальность – различная направленность наполнения парковых пространств на разные возрастные и социальные группы. Приоритетная задача – создание комфортного и интересного пространства для разных категорий посетителей.

4) Экологичность, комфорт и безопасность – обеспечение чистоты окружающей среды и психологического комфорта граждан.

Достойным примером гармоничной планировки парка на исторической территории авторы считают Петровский сквер в городе Воронеже, выполненный в стилистике времени Петровской эпохи.

В статье Е.П. Кузнецовой и А.Э. Садыковой Проводится аналитический обзор мемориальных парков России и мира, отмечаются особенности их проектирования и эксплуатации. Также авторами предлагается концепция собственного мемориального парка [14]. В статье С.В. Сарайкиной, Л.В. Сотова, А.И. Устиновой приводится сравнительный анализ парковых территорий города Саранска. Авторы выявляют сильные, слабые стороны, угрозы и возможности парковых территорий, а также анализируют их наполненность и дают рекомендации [15].

В статье О. С. Жигалова поднимается вопрос необходимости взаимодействия органов муниципальной власти с горожанами по вопросам новых технологий в сфере благоустройства [16].

В работе М. Абдельхамид рассматривается необходимость использования современных технологий в поддержании парковых пространств. Автор приводит обзор современных технологий в сфере благоустройства: автоматизированного полива растений, использования дождевой воды, автоматизированного кошения газонов, использования солнечной энергии и энерго-генерирующих спортивных площадок, размещения умных скамеек с зарядкой для смартфона и wi-fi, установка экономичного освещения с датчиками движения. Автор подчеркивает, что данные технологии являются необходимыми для использования в современном благоустройстве, так как они отвечают тенденциям устойчивого проектирования, ресурсосбережения и автоматизации [17].

В исследовании П. Читкати рассматривается польза задействования исторических парков в туристических маршрутах. Путем анализа информации автор приходит к мнению, что маршруты, включающие в себя исторические парки, крайне положительно воспринимаются туристами, так как раскрывают историю места и включают в экскурсию рекреационную составляющую [18].

На основе анализа современного отечественного и зарубежного опыта можно выявить следующие принципы реконструкции мемориальных парков. Мемориальные парки являются важнейшими градообразующими объектами, При их проектировании необходимо как можно доступнее осветить их историческую ценность, рассказать о связанных с ними событиях прошлого. В мемориальных парках необходимо наличие зон, площадок, а также объектов, раскрывающих исторические события. Для последовательного ознакомления с мемориальными объектами парка рекомендуется использовать регулярную планировку.

Все мемориальные объекты, в том числе скульптура, малые архитектурные формы, а также подобранное озеленение должны отвечать концепции строгости и уважения к истории предков, соответствующей мемориальным паркам.

Для большего эмоционального воздействия и более глубокого раскрытия истории территории рекомендуется создание туристических маршрутов, включающих мемориальные парки, прилежащие к ним исторические территории, объекты, а также тематические музеи.

Помимо особенностей, относящихся конкретно к мемориальным паркам, необходимо чтобы реконструируемая территория отвечала стандартам современного использования. Перемещение на территории парка должно быть организовано с соблюдением градаций пешеходных троп, как по функциональному значению, так и по плотности потока посетителей. Необходимо наличие освещения, которое бы создавало комфортную среду для восприятия объектов парка, оказывало определенное эмоциональное воздействие на посетителя. Необходимо также наличие функциональных зон, таких как детские, спортивные площадки, площади для организации событийных

мероприятий, санитарные площадки и т.п. Также на всей территории парка необходимо наличие удобной и современной уличной мебели.

Современный парк должен отвечать стандартам экологичности, комфорта и безопасности окружающей среды и посетителей. Внедрение экологических решений в парковую среду, таких как солнечные батареи, использование дождевой воды, автоматизация ухода за благоустройством – является важнейшей тенденцией, которая постепенно должна будет применяться повсеместно.

На данный момент в парке Петрова в г. Казани недостаточно прослеживается идейный каркас территории. Предлагается усилить мемориальную составляющую парка дополнительными памятными объектами, а также культурно-просветительскими инсталляциями, наглядно раскрывающими роль порохового завода в истории нашей страны. Жители и гости города смогут посетить музей под открытым небом, познакомиться с историей места, узнают о подвигах Героев Отечества и достижениях в оборонной промышленности страны. Экспозиция будет направлена на развитие чувства воодушевления и гордости за Родину.

Не менее важна рекреационная составляющая территории. Планировку парка предлагается дополнить новой аллеей, размещенной перпендикулярно существующей главной аллее со стелой (см. рис. 2). Аллея соединит новую видовую площадку, парковку и существующую главную аллею, а завершением ее станет новый вход в парк со стороны улицы Богатырева. Новую аллею предлагается увековечить в память о В.А. Трифонове, известном архитекторе Казани и порохового завода, трагически погибшем при пожаре 1922 года. В завершении аллеи предлагается организовать мемориальную площадку, разместив на ней бюст архитектора и экспозицию, посвященную его выдающимся творениям.

Территорию парка предлагается дополнить двумя видовыми площадками в южной части, с которых гости парка смогут изучить вид на старое русло Казанки, Зилантов Свято-Успенский монастырь, Адмиралтейскую слободу Казани.

Существующую прогулочную тропу предлагается замкнуть, продлив ее по южной стороне относительно оси главной аллеи. Таким образом, тропа будет эффективнее использоваться для тихих прогулок и утренних пробежек, а кроме того объединит новые и существующие функциональные зоны. На прогулочном маршруте предусмотрено размещение тихих рекреационных зон с установкой уличной мебели и малых архитектурных форм.

Предлагается реконструировать существующую парковку, предусмотрев места для легковых автомобилей и туристического автобуса. Места для автомобилей будут чередоваться с озелененными зонами высаженных кустарников и деревьев, формируя органичную ландшафтную композицию. Озеленение также способствует снижению нагрева транспортных средств от прямых солнечных лучей в теплое время года.

Моделью предусмотрена реконструкция существующей зоны для проведения событийных мероприятий. Подразумевается ее дополнение небольшой крытой сценой, лавками с горячими и холодными напитками, уличной едой, сувенирной продукцией (см. рис. 3). В шаговой доступности для гостей парка будут предусмотрены две детские площадки и благоустроенная спортивная зона.

Вблизи зоны событийных мероприятий расположена площадка с фонтаном, который на данный момент не является действующим. Предлагается реконструировать фонтан, спроектировав его архитектурный облик в мемориальной тематике порохового завода. Фонтан станет местом притяжения для посетителей, а также будет формировать запоминающуюся ассоциацию с территорией (см. рис. 4). Проектирование фонтана может стать предметом отдельного исследования.

В зимнее время предлагается организовать каток на главной аллее, что повысит привлекательность парка и послужит поддержанию здорового образа жизни горожан (см. рис. 5) [19]. Возможна организация зимней экспозиции ледовых тематических скульптур. В зоне событийных мероприятий подразумевается установка новогодней ели на специально оборудованную площадку (см. рис. 3).

В ходе натурных исследований было установлено, что значительная часть существующих в парке малых архитектурных форм устарела и не отвечает концепции

современной развивающейся городской среды. Предлагается установить в парке современную уличную мебель, урны, фонари. Необходимо дополнительно предусмотреть эстетическое освещение в вечернее время, дополняющее ландшафтную композицию.

Существующее озеленение парка предлагается дополнить посадкой характерных для региона растений с целью придания национального колорита, таких как: черемуха, сирень, калина и т.п. Цель озеленения – формирование целостной ландшафтной композиции парка.

На всей территории парка необходимо предусмотреть следующие объекты инфраструктуры: санитарные узлы, информационные стенды, навигацию.

Для развития туристско-рекреационного потенциала территории необходимо организовать туристический маршрут по историческим местам Кировского района, включив в него: Парк Петрова, Музей порохового завода, мануфактуру Алафузова, Алафузовский театр, Зилантов Свято-Успенский монастырь и другие исторические объекты Адмиралтейской слободы.

3. Результаты и обсуждение

Собрана литература и иконографические материалы, связанные с историей парка Петрова. На основе собранных материалов написана краткая историческая справка.

Были проведены натурные исследования территории и окрестностей парка. Выполнена фотофиксация, собраны исходные данные для работы, выполнены развертки по улицам Богатырева и Степана Халтурина.

На основе натурных исследований был произведен SWOT-анализ (SWOT расш. Strengths – сильные стороны; Weaknesses – слабые стороны; Opportunities – возможности; Threats – угрозы). Выявлены недостатки среды.

На основе натурных исследований были выполнены следующие схемы: Схема анализа транспортно-пешеходных данных; Схема существующего функционального анализа парка; Схема функционального предложения; Схема развития застройки жилыми комплексами кварталов вблизи парка.

На основе анализа ближайшей территории предлагается формирование туристического маршрута, включающего парк Петрова и ближайшие к нему исторические объекты интереса, выполнена соответствующая схема.

На основе существующего состояния и рекреационного потенциала территории, выполненных натурных исследований, выявленных принципов реконструкции мемориальных парков, анализа литературы и иконографии, разработана концепция благоустройства и повышения туристической привлекательности рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани. В соответствии с моделью была разработана схема генерального плана территории (см. рис. 1), а также видовые кадры (см. рис. 2-4).

Последняя значительная реконструкция в парке производилась в 2008 году, но и она не решила проблем данной территории, среди которых незавершенная идейная и ландшафтная композиции, размещенная не в соответствии с нормативом детская площадка, а также устаревшая уличная мебель и т.д. Данная концепция учитывает решение данных недостатков, а также предлагает современный подход к благоустройству, основываясь на современном отечественном опыте. Данное исследование обладает практической значимостью, так как материалы работы были переданы МБУ Институту развития города и будут учтены при формировании проекта по развитию данной территории.

Предметом отдельного дальнейшего исследования может быть проектирование фонтана на территории парка в мемориальной тематике порохового завода.

Экспликация к схеме генерального плана (см. рис.1)

1 – «Красные ворота» (существующее); 2 – Главная аллея (сущ.); 3,4 – Монументы (сущ.); 5 – Покрытие для катания на роликах, в зимнее время коньках (проектируемое); 6 – Стела (сущ.); 7 – Фонтан (проект.); 8 – Детская площадка для дошкольного возраста (проект.); 9 – Детская площадка для младшего школьного возраста (проект.); 10 – Прогулочная тропа (проект.); 11 – Новый вход в парк (проект.); 12 – Зона установки ели (проект.); 13 – Зона событийных мероприятий (проект.); 14 – Модель РСЗО (сущ.); 15 – Спортивная площадка (рекност.); 16 – Мемориальная аллея (проект.); 17 - Видовая

площадка (проект.); 18 – Мемориальная площадка архитектора В.А. Трифонова (проект.); 19 – Монумент (сущ.); 20 – «Катюша» (сущ.); 21 – Автобусная остановка (сущ.); 22 – Парковка для автомобилей и автобуса (проект.); 23 – Видовая площадка на стилобате утраченного ДК 10-летия ТАССР (проект.); 24 – Спортивная школа.



Рис.1 Схема генерального плана (иллюстрация авторов)
Fig.1 Master plan diagram (illustration by the authors)



Рис.2 Мемориальная аллея, летнее время (иллюстрация авторов)
Fig.2 Memorial Alley, summer time (illustration by the authors)



Рис.3 Зона событийных мероприятий, зимнее время (иллюстрация авторов)
Fig.3 Event zone, winter time (illustration by the authors)



Рис.4 Зона фонтана, летнее время (иллюстрация авторов)
Fig.4 Fountain zone, summer time (illustration by the authors)



Рис.5 Главная аллея, зимнее время (иллюстрация авторов)
Fig.5 Main alley, winter time (illustration by the authors)

4. Заключение

1. Территория парка Петрова обладает значительным потенциалом для развития. Парк расположен вблизи значимых городских территорий и объектов: Старое русло реки Казанки, Зилантов Свято-Успенский монастырь, Адмиралтейская слобода, Мануфактура Алафузова и Алафузовский театр, Музей Порохового завода. Все эти объекты, вместе с территорией парка, могут быть объединены в единый туристический маршрут. В непосредственной близости от парка располагаются строящиеся жилые комплексы, жителям которых необходимо наличие рекреационных благоустроенных зон для отдыха, прогулок с детьми, занятий спортом, проведения событийных мероприятий. Мемориальная и историческая значимость территории парка, дополняют существующий потенциал. Парк расположен на ровной, хорошо озелененной местности.

2. На основе анализа современного отечественного и зарубежного опыта в сфере развития рекреационной парковой среды выявлены принципы реконструкции мемориальных парков. Мемориальные парки играют важную воспитательную и просветительскую роль. Грамотный проект мемориального парка должен включать в себя мемориальные объекты и культурно-просветительские сооружения, а планировка парка должна последовательно раскрывать их смысловое значение. Реконструируемый парк должен отвечать стандартам современного использования.

3. На основе существующего состояния и рекреационного потенциала территории, выполненных натурных исследований, выявленных принципов реконструкции мемориальных парков, анализа литературы и иконографии, разработана концепция благоустройства рекреационной среды на территории парка им. Петрова г. Казани. Одна из целей - повышение туристической привлекательности территории. В соответствии с концепцией были разработаны схема генерального плана территории парка Петрова, визуализации элементов парка. Данная концепция включает в себя мемориальные объекты, отвечает выявленным принципам реконструкции мемориальных парков, а также соответствует стандартам современного использования. Благодаря формированию туристического маршрута, включающего мемориальный парк и ближайшие исторические объекты, парк Петрова будет включен в туристическую систему города.

Список литературы / References

1. Халиков А. Х. Казань в памятниках истории и культуры / Халиков А. Х. и др. — Казань: Татарское книжное издательство, 1982. — 282 с. [Khalikov A. Kh. Kazan in monuments of history and culture / Khalikov A. Kh. et al. - Kazan: Tatar Book Publishing House, 1982. - 282 p.]
2. Кочурова М. Б. Петров Роман Ефимович / Борцы за счастье народное: биографические очерки / сост. М. Б. Кочурова и др.. — Казань: Татарское книжное издательство, 1967. — С. 358—362. — 511 с. [Kochurova M. B. Petrov Roman Efimovich / Fighters for people's happiness: biographical sketches / comp. M. B. Kochurova and others. - Kazan: Tatar Book Publishing House, 1967. - P. 358-362. — 511 p.]
3. Смыков Ю. И. Республика Татарстан: памятники истории и культуры (каталог-справочник) / Смыков Ю. И. и др.. — Казань: Издательство «Эйдос», 1993. — 453 с. — ISBN 5858760023. [Smykov Yu. I. Republic of Tatarstan: monuments of history and culture (catalogue-reference book) / Smykov Yu. I. et al. - Kazan: Publishing House "Eidos", 1993. - 453 p. — ISBN 5858760023]
4. Тарунов. А. М. Объекты культурного наследия Республики Татарстан: Казань: Иллюстрированный каталог / сост. Тарунов. А. М. — Москва: НИИЦентр, 2018. — 984 с. [Tarunov. A. M. Cultural heritage sites of the Republic of Tatarstan: Kazan: Illustrated catalog / comp. Tarunov. A. M. - Moscow: NIITsentr, 2018. - 984 p.]
5. Надырова Х. Г. Юбилейная арка / гл. ред. Мазгаров А. М. — Татарская энциклопедия. — Казань: Институт Татарской энциклопедии Академии наук Республики Татарстан, 2014. — С. 471. — 720 с. — ISBN 9785902375111. [Nadyrova Kh. G. Anniversary Arch / ch. ed. Mazgarov A. M. - Tatar Encyclopedia. -

- Kazan: Institute of the Tatar Encyclopedia of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2014. - P. 471. - 720 p. — ISBN 9785902375111]
6. Шайдуллин Р. В. Казань: исторические районы, слободы, улицы, площади и парки: иллюстрированный энциклопедический справочник / под ред. Р. В. Шайдуллина. — Казань: Институт Татарской энциклопедии и регионоведения Академии наук Республики Татарстан, 2021. — Т. 1. — 280 с. [Shaydullin R.V. Kazan: historical districts, settlements, streets, squares and parks: an illustrated encyclopedic reference book / ed. R.V. Shaidullina. - Kazan: Institute of the Tatar Encyclopedia and Regional Studies of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2021. - Vol. 1. - 280 p.]
 7. Новикова М. П., Юпина Г. А. / Сады и парки Казани: коллекция фотографий и открытых писем с видами садов и парков Казани конца XIX — середины XX века. — Казань: Издательство «Фолиант», 2012. — 127 с. [Novikova M.P., Yupina G.A. / Gardens and parks of Kazan: a collection of photographs and open letters with views of gardens and parks of Kazan from the late 19th to mid-20th centuries. - Kazan: Publishing House "Foliant", 2012. - 127 p.]
 8. Персова С. Г. Дворец культуры имени 10-летия ТАССР / гл. ред. М. Х. Хасанов. — Татарская энциклопедия. — Казань: Институт Татарской энциклопедии Академии наук Республики Татарстан, 2005. — С. 236. — 656 с. — ISBN 5902375029. [Persova S.G. Palace of Culture named after the 10th anniversary of the TASSR / ch. ed. M. Kh. Khasanov. - Tatar Encyclopedia. - Kazan: Institute of the Tatar Encyclopedia of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2005. - P. 236. - 656 p. — ISBN 5902375029.]
 9. Официальный сайт администрации Кировского и Московского района // г. Казань. URL: <https://kzn.ru/meriya/administratsii-rayonov/kirovskiy-i-moskovskiy/o-rayonakh/> (дата обращения: 12.06.2023). [Official website of the administration of the Kirov and Moskovsky district // Kazan. URL: <https://kzn.ru/meriya/administratsii-rayonov/kirovskiy-i-moskovskiy/o-rayonakh/> (access date: 06/12/2023).]
 10. Решение Казанской городской Думы N 2-12 "О Стратегии социально-экономического развития муниципального образования г. Казани до 2030 года" (с изменениями и дополнениями), 2021 г — 82 с. [Resolution of the Kazan City Duma No. 2-12 "On the Strategy for the socio-economic development of the municipality of Kazan until 2030" (with amendments and additions), 2021 - 82 p.]
 11. Paraskevopoulou A., Klados A., Malesios C. Historical Public Parks: Investigating Contemporary Visitor Needs / Challenges for Historic Gardens' Sustainability between Restoration and Management — Greece: Laboratory of Floriculture and Landscape Architecture, Department of Crop Science, School of Plant Sciences, Agricultural University of Athens, 2020 — 29 p. DOI:10.3390/su12239976
 12. Sarkisyants M. G. Memorial Park Evolution / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1079 (2021) 022075 — Honolulu: International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020), 2021 — 4p. doi:10.1088/1757-899X/1079/2/022075
 13. Гагарин, Б. Г. Проектирование мемориальных парков / Б. Г. Гагарин, М. Д. Тулбаева // Новая наука: Стратегии и векторы развития. — 2016. — № 4-3(76). — С. 135-139. — EDN VTKXVF. [Gagarin, B. G. Design of memorial parks / B. G. Gagarin, M. D. Tulbaeva // New science: Strategies and vectors of development. — 2016. — No. 4-3(76). — P. 135-139. — EDN VTKXVF.]
 14. Сарайкина, С. В. Парки г. Саранска как рекреационные объекты / С. В. Сарайкина, Л. В. Сотова, А. И. Устинова // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. — 2022. — Т. 8, № 3. — С. 42-53. — DOI 10.18413/2408-9346-2022-8-3-0-4. — EDN UBNGRZ. [Saraikina, S. V. Parks of Saransk as recreational facilities / S. V. Saraikina, L. V. Sotova, A. I. Ustinova // Scientific result. Business and service technologies. — 2022. — Vol. 8, No. 3. — P. 42-53. — DOI 10.18413/2408-9346-2022-8-3-0-4. — EDN UBNGRZ]
 15. Жигалов, О. С. Мировые практики в сфере благоустройства и озеленения территорий и опыт по благоустройству и озеленению Г. Москвы / О. С. Жигалов, И. А. Прохорова // Материалы Ивановских чтений. — 2017. — № 1-1(10). — С. 119-

125. – EDN XDYQCL. [Zhigalov, O. S. World practices in the field of improvement and landscaping of territories and experience in improvement and landscaping of Moscow / O. S. Zhigalov, I. A. Prokhorova // Materials of the Ivanovo Readings. – 2017. – No. 1-1(10). – P. 119-125. – EDN XDYQCL.]
16. Тарунов. А. М. Объекты культурного наследия Республики Татарстан: Казань: Иллюстрированный каталог / сост. Тарунов. А. М. — Москва: НИИЦентр, 2018. — 984 с. [Tarunov. A. M. Cultural heritage sites of the Republic of Tatarstan: Kazan: Illustrated catalog / comp. Tarunov. A. M. - Moscow: NIITsentr, 2018. - 984 p.]
17. Abdelhamid M. Revitalization Of Historical Urban Parks Using A Smart Approach / Engineering Research Journal 164 (Decamber 2019) A20- A35 — Alexandria, Egypt: Department of Architecture, Pharos University In Alexandria, 2019 — 15 p. DOI:10.21608/erj.2019.123878
18. Chitkati, P. Tourism Route Development of Historical Park in Lower Northern of Thailand / Journal of Arts Management ISSN 2630—0427 — Thailand: 5(1), 13 p.
19. Zhang C., Ming Y., Xiaoming L. Impact of Urban Historical Parks on Physical Activity and Public Health in Beijing / Journal of Urban Planning and Development — China: 2022 — 10 p. DOI:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000852

Информация об авторах

Марат Шигабатович Фазлеев, доцент, кандидат архитектуры, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: fastin@mail.ru

Дияров Рашид Наилевич, инженер-проектировщик, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

E-mail: twigiriko@mail.com

Information about the authors

Marat Sh. Fazleev, associate professor, candidate of architecture, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: fastin@mail.ru

Rashid N. Diarov, engineer, project designer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: twigiriko@mail.com



Проектирование дорожных одежд со слоями из модифицированных кремнийорганическими соединениями цементогрунтов

Е.А. Вдовин¹, П.Е. Буланов¹, В.Ф. Строганов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Одним из актуальных направлений повышения эффективности строительства автомобильных дорог является применение цементогрунтов в конструктивных слоях дорожных одежд. Однако широкое применение цементогрунтов в дорожно-климатических зонах с сезонными, суточными изменениями температур и переходом через 0 °С препятствует необходимости достижения высокого уровня физико-механических и эксплуатационных характеристик цементогрунтовых слоев дорожных одежд. В технологии укрепления грунтов повышение уровня данных показателей возможно при добавлении технологической стадии по модификации цементогрунтов, в том числе гидрофобизаторами на основе кремнийорганических соединений с объемными алифатическими радикалами. Анализ литературы позволил установить, что системные исследования по влиянию строения и объема алифатического радикала кремнийорганических соединений на эффективность модификации дорожных цементогрунтов не проводились. Для обеспечения возможности проектирования дорожных одежд со слоями из модифицированных цементогрунтов требуется также установление зависимостей влияния гидрофобизации на расчетные характеристики конструктивных слоев, оптимальные значения которых позволят использовать их в расчетах конструкций.

Результаты. На основе выявленных зависимостей влияния кремнийорганических соединений с алифатическими радикалами повышенной молекулярной массы, способствующих росту уровней физико-механических и расчетных характеристик цементогрунтов, проведено конструирование и расчет трех вариантов конструкций дорожных одежд IV технической категории облегченного типа со слоями из модифицированных укрепленных грунтов. Установлено, что гидрофобизация цементогрунтов изо-бутил-, октил- и додецилтриэтоксисилоном обеспечивает повышение предела прочности на сжатие в пределах от 34 до 83 %, предела прочности на растяжение при изгибе от 33 до 131 %, коэффициента морозостойкости от 35 до 76 % по сравнению с немодифицированными составами. Установлено, что модификация цементогрунтов исследованными кремнийорганическими соединениями способствуют повышению уровня расчётных характеристик цементогрунтовых слоев дорожных одежд и, в частности, гидрофобизация укрепленного грунта додецилтриэтоксисилоном обеспечивает повышение модуля упругости: при 6 % портландцемента на 64 %; при 10 % – 53 %; при 14 % – 44 %.

Выводы. Показана возможность проектирования конструкций дорожных одежд со слоями из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с объемными алифатическими радикалами. Это позволит повысить эффективность строительства автомобильных дорог. Полученные результаты конструирования и расчетов вариантов дорожных одежд будут способствовать расширению региональной сырьевой базы и продлению сроков службы автомобильных дорог при использовании цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями.

Ключевые слова: строительство автомобильных дорог, проектирование дорожных одежд, модифицированные цементогрунты, кремнийорганические соединения, расчетные характеристики, модуль упругости

Для цитирования: Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Проектирование дорожных одежд со слоями из модифицированных кремнийорганическими соединениями цементогрунтов // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 207-216, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20, EDN: ZABBNC

Design of road pavements with layers of soil-cement modified with organosilicon

E.A. Vdovin¹, P.E. Bulanov¹, V.F. Stroganov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* One of the current trends in increasing the efficiency of roads construction is the use of soil-cement in the structural layers of road pavements. However, the widespread use of soil-cement in road-climatic zones with seasonal changes, daily temperature changes and transition through 0° C is hampered by the need to achieve a high level of physical, mechanical and operational characteristics of soil-cement layers of road pavements. In the technology of soil strengthening, increasing the level of these indicators is possible by adding a technological stage for modifying soil-cement, including water repellents based on organosilicon compounds with bulky aliphatic radicals. The analysis of the sources made it possible to establish that systematic studies on the influence of the structure and volume of the aliphatic radical of organosilicon compounds on the efficiency of modification of road soil-cement have not been carried out. To ensure the possibility of designing road pavements with layers of modified soil-cement, it is also necessary to establish the dependencies of the influence of hydrophobization on the design characteristics of structural layers, the optimal values of which will allow them to be used in structural calculations.

Results. Based on the identified dependencies of the influence of organosilicon compounds with aliphatic radicals of high molecular weight, which contribute to an increase in the levels of physical-mechanical and design characteristics of soil-cement, three design options for road pavements of the IV technical category of the lightweight type with layers of modified reinforced soils were designed and calculated. It has been established that hydrophobization of soil-cement with iso-butyl-, octyl- and dodecyltriethoxysilane provides an increase in compressive strength in the range from 34% to 83 %, tensile strength in bending from 33% to 131%, freeze-thaw resistance coefficient from 35% to 76% compared with unmodified compounds. It has been established that modification of soil-cement with the studied organosilicon compounds helps to increase the level of design characteristics of soil-cement layers of road pavements and, in particular, hydrophobization of reinforced soil with dodecyltriethoxysilane provides an increase in the elastic modulus: at 6 % Portland cement by 64 %; at 10 % – 53 %; at 14 % – 44 %.

Conclusions: The possibility of designing road pavement structures with layers of soil-cement modified with organosilicon compounds with bulky aliphatic radicals is shown. This will improve the efficiency of road construction. The obtained results of design and calculations of road pavement options will contribute to expanding the regional raw material base and extending the service life of highways when using soil-cement modified with organosilicon compounds.

Keywords: construction of roads, design of road pavements, modified soil-cement, organosilicon compounds, design characteristics, modulus of elasticity

For citation: Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Design of road pavements with layers of soil-cement modified with organosilicon // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 207-216, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20, EDN: ZABBNC

1. Введение

Учитывая тенденцию энергосберегающих строительных технологий, следует отметить, что технология укрепления глинистых грунтов является одним из приоритетных направлений дорожного строительства [1]. Объемы строительства автомобильных дорог в Российской Федерации растут, поэтому задачи снижения стоимости строительства являются актуальными. Стоимость строительства автомобильных дорог во многом зависит от затрат на логистику. Глинистые грунты являются наиболее распространенными (до 60 %), а месторождения горных пород высокой прочности встречаются крайне редко. Это обстоятельство обуславливает значительное увеличение транспортных расходов на доставку высокопрочного щебня к объектам дорожного строительства. Использование грунтов региональных месторождений, в том числе глинистых, укрепленных вяжущими, является одним из возможных способов снижения затрат на строительство, реконструкцию и капитальный ремонт автомобильных дорог [2, 3].

Начиная с середины XX века внедрялись различные методы укрепления грунтов с применением органических, неорганических и комплексных вяжущих [4]. Научные исследования и практический опыт показал, что для укрепления грунтов рекомендуется и применение минеральных вяжущих веществ, особенно портландцемента [7, 8]. Однако, применение одного вяжущего бывает недостаточно для достижения нормативных требований по прочности и морозостойкости, особенно в глинистых грунтах, без дополнительной модификации [9, 10]. Одним из перспективных направлений в области повышения эффективности технологии укрепления грунтов в дорожном строительстве является модификация цементогрунтов. Модифицированные цементогрунты зарекомендовали себя в основаниях конструкций дорожных одежд капитального и облегченного типов, а также в покрытиях переходного и низшего типов с применением технологии поверхностной обработки [5, 6]. Анализ публикаций и научно-практического опыта данного периода свидетельствует, что для обеспечения уровня требуемых показателей к конструктивным слоям дорожных одежд с учетом увеличения интенсивности движения и транспортной нагрузки [11, 12] для укрепления глинистых грунтов цементом, необходимо обязательное применение технологической стадии по модификации цементогрунтов [13, 14].

Известно, что одним из методов повышения качества и долговечности цементогрунтов является гидрофобизация, придающая поверхностям минеральных частиц и их агрегатам способность не смачиваться водой [15-17]. Наиболее эффективными модификаторами для снижения водопоглощения и повышения морозостойкости укрепленных грунтов являются кремнийорганические соединения (силаны, силоксаны и др.) [18, 19]. Однако в публикациях рассматриваются только кремнийорганические соединения с короткой углеводородной цепью. Поэтому нами проводятся комплексные исследования по влиянию модификации кремнийорганическими соединениями с алифатическим радикалами повышенной молекулярной массы на физико-механические, технологические, расчетные и эксплуатационные характеристики цементогрунтовых слоев дорожных одежд [20, 21].

Из анализа литературных источников установлено также, что для проектирования конструкций дорожных одежд со слоями из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями, особенно с алифатическим радикалами повышенной молекулярной массы, отсутствуют необходимые данные по значениям расчетных характеристик гидрофобизированных укрепленных грунтов.

В связи с изложенным, целью работы является разработка конструкций дорожных одежд IV технической категории облегченного типа со слоями из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с алифатическим радикалами объемной молекулярной массы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование физико-механических характеристик цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с алифатическими радикалами повышенной молекулярной массы;

- определение расчетных характеристик цементогрунтов, модифицированных эффективным кремнийорганическим соединением;
- конструирование и расчет дорожных одежд со слоями оснований из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическим соединением с объемным алифатическим радикалом.

2. Материалы и методы

В качестве глинистого грунта применен суглинок тяжелый пылеватый с числом пластичности – 0,129 и содержанием песчаных частиц – 7 % по ГОСТ 25100. Для укрепления грунтов применялся портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент».

Модификация цементогрунтов проводилась кремнийорганическими соединениями: изо-бутилтриэтоксисилан (ИБТЭС); октилтриэтоксисилан (ОТЭС); додецилтриэтоксисилан (ДТЭС).

В соответствии с ГОСТ 23558 исследованы физико-механические свойства цементогрунтов: предел прочности на сжатие ($R_{сж}$), предел прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$) и коэффициент морозостойкости. Определение прочности проводилось после нормального твердения образцов в течении 28 суток и водонасыщения образцов в течении 2 суток. Для приготовления цементогрунтовых образцов вода вводилась в количестве, обеспечивающим оптимальную влажность материала. Коэффициент морозостойкости цементогрунтовых образцов определялся как отношение прочности водонасыщенного образца к прочности укрепленных грунтов после попеременного замораживания-оттаивания. Из расчетных характеристик конструктивных слоев дорожных одежд рассмотрены следующие показатели: предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$), объемная плотность и модуль упругости. Призмная прочность и модуль упругости цементогрунтов определялась по ГОСТ 24452. Объемная плотность цементогрунтов исследовалась по ГОСТ 12730.1.

Конструирование и расчет дорожных одежд IV технической категории облегченного типа со слоями оснований из цементогрунтов выполнялось в соответствии с ГОСТ Р 58818 и ПНСТ 542.

3 Результаты и обсуждение

На рисунках 1, 2 и 3 показано, что модификация цементогрунтов изо-бутилтриэтоксисиланом в количестве от 0,15 до 0,75 %, октилтриэтоксисиланом – от 0,02 до 0,1 % и додецилтриэтоксисиланом – от 0,02 до 0,1 % приводит к повышению уровня следующих физико-механических показателей: $R_{сж}$ на 34 %, 76 %, 83 %; $R_{изг}$ на 90 %, 33 %, 131 %; $K_{мор}$ на 35 %, 67 %, 76 % соответственно.

Оптимизация модифицированных цементогрунтов позволила получить марки по прочности М20, М40 и М60 и морозостойкости F10 и F15 в соответствии с ГОСТ23558. Модификация кремнийорганическими соединениями в исследуемом ряду обеспечивает повышение физико-механических свойств цементогрунтов при оптимальном количествах модификаторов: изо-бутилтриэтоксисилана – 0,3 %; октилтриэтоксисилана – 0,06 %; додецилтриэтоксисилана – 0,04 %.

Выявлено, что додецилтриэтоксисилан является наиболее эффективным модификатором с точки зрения повышения прочностных показателей и морозостойкости в цементогрунтах по сравнению с изо-бутилтриэтоксисиланом и октилтриэтоксисиланом. Повышение молекулярной массы алифатического радикала обеспечило повышение уровня физико-механических свойств при меньшем содержании модификаторов в составе укрепленных грунтов.

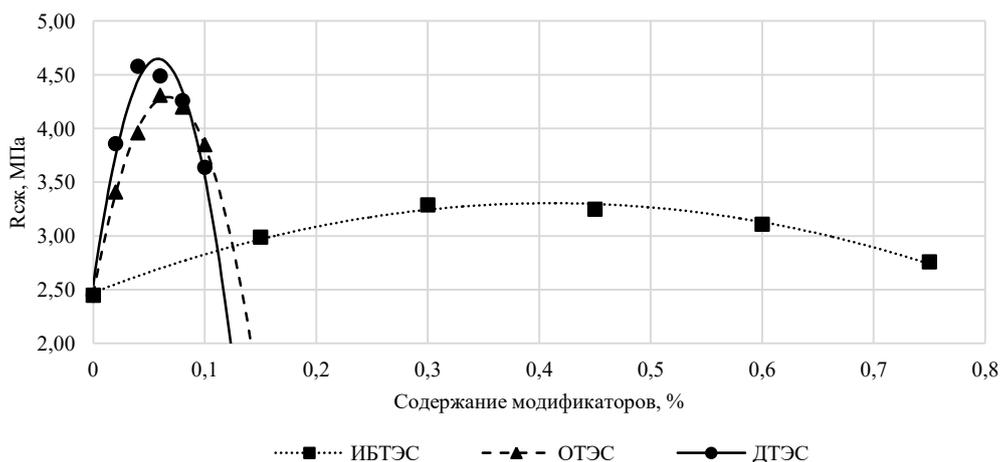


Рис. 1. Зависимость влияния кремнийорганических соединений на предел прочности при сжатии модифицированных цементогрунтов при содержании 10 % портландцемента (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the compression ultimate strength of modified soil-cement containing 10 % Portland cement (illustration by the authors)

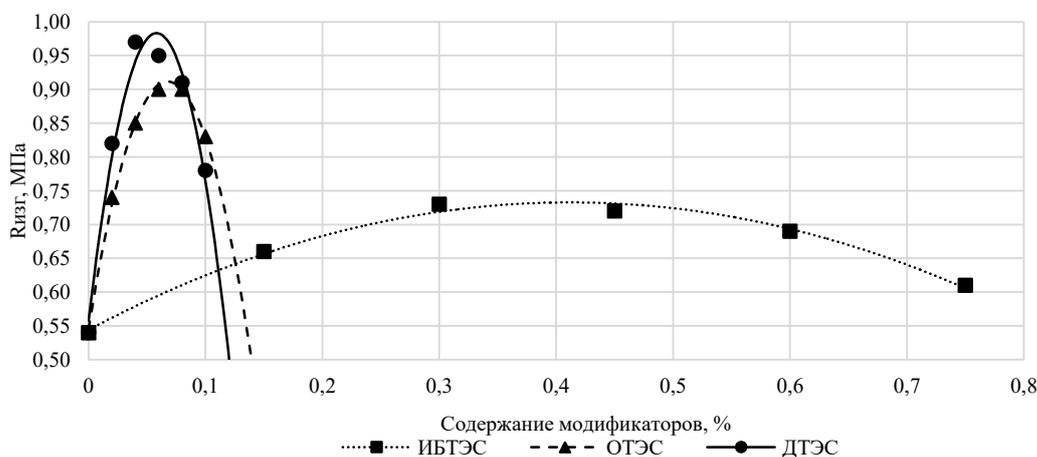


Рис. 2. Зависимость влияния кремнийорганических соединений на предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов при содержании 10 % портландцемента (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the tensile strength in bending of modified soil-cement containing 10 % Portland cement (illustration by the authors)

Определены расчетные характеристики модифицированного цементогрунта. Установлено, что модификация цементогрунтов додецилтриэтоксисиланом обеспечивает повышение модуля упругости: при 6 % портландцемента на 64 %; при 10 % – 53 %; при 14 % – 44 % (рис. 4). Модификация цементогрунта додецилтриэтоксисиланом незначительно снижает объемную плотность образцов (рис. 5). На наш взгляд, это связано с химической реакцией взаимодействия модификатора с поверхностью глинистых минералов и портландита, приводящей к образованию органоминеральных фаз и спирта. Спирт действует как воздухововлекающий агент, снижая поверхностное натяжение на границе «вода-воздух», приводя к дополнительному повышению морозостойкости [22].

Проведены расчет и конструирование трех вариантов дорожных одежд IV технической категории облегченного типа с низкой интенсивностью движения со слоями из цементогрунтов, модифицированных додецилтриэтоксисиланом. Исходными данными при расчете явились: дорожно-климатическая зона – III; подзона – 2; техническая категория автомобильной дороги – IV; регион проектирования – Республика Татарстан; тип конструкции дорожной одежды – облегченный; срок службы покрытия – 24 года; межремонтный срок покрытия – 12 лет; коэффициент надежности – 0,85; глубина

промерзания грунта – 160 см; грунт рабочего слоя – супесь легкая; требуемый модуль упругости – 250 МПа; нормативная статическая нагрузка на ось – 100 кН; диаметр штампа – 37,1 см; давление в шинах – 0,6 МПа.

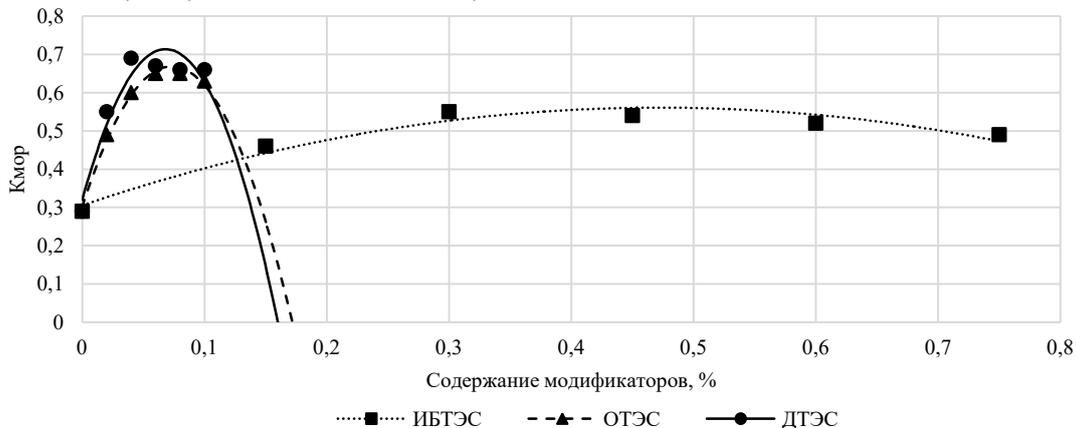


Рис. 3. Зависимость влияния кремнийорганических соединений на коэффициент морозостойкости модифицированных цементогрунтов при содержании 10 % портландцемента (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of the influence of organosilicon compounds on the freeze-thaw resistance coefficient of modified soil-cement containing 10 % Portland cement (illustration by the authors)

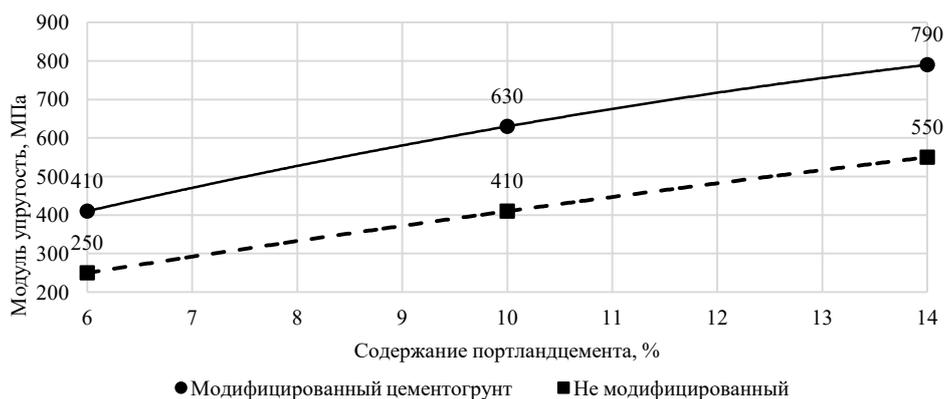


Рис. 4. Сравнительная зависимость модуля упругости цементогрунтов от содержания портландцемента (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Comparative dependence of the elastic modulus of soil-cement on the content of Portland cement (illustration by the authors)

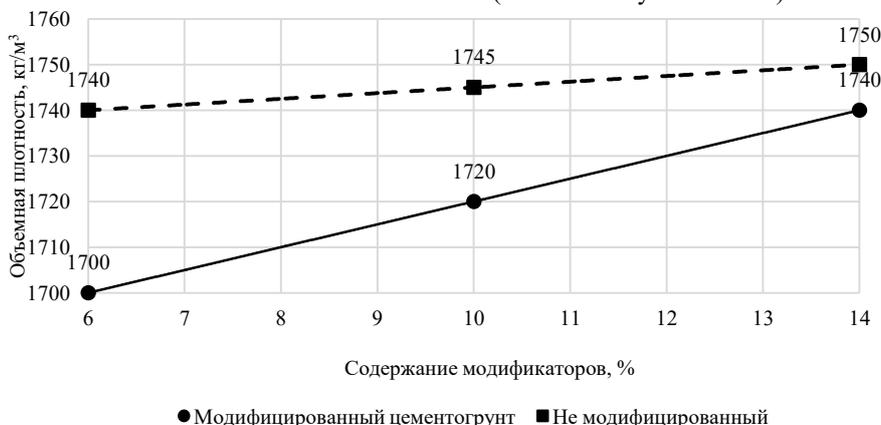


Рис. 5. Сравнительная зависимость объемной плотности цементогрунтов от содержания портландцемента (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Comparative dependence of the bulk density of soil-cement on the content of Portland cement (illustration by the authors)

Проведены расчеты конструкций дорожных одежд по допускаемому упругому прогибу, по условию сдвигустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев, на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе, на морозостойкость и толщину дренирующего слоя. Результаты расчета представлены на рис. 6 и табл.

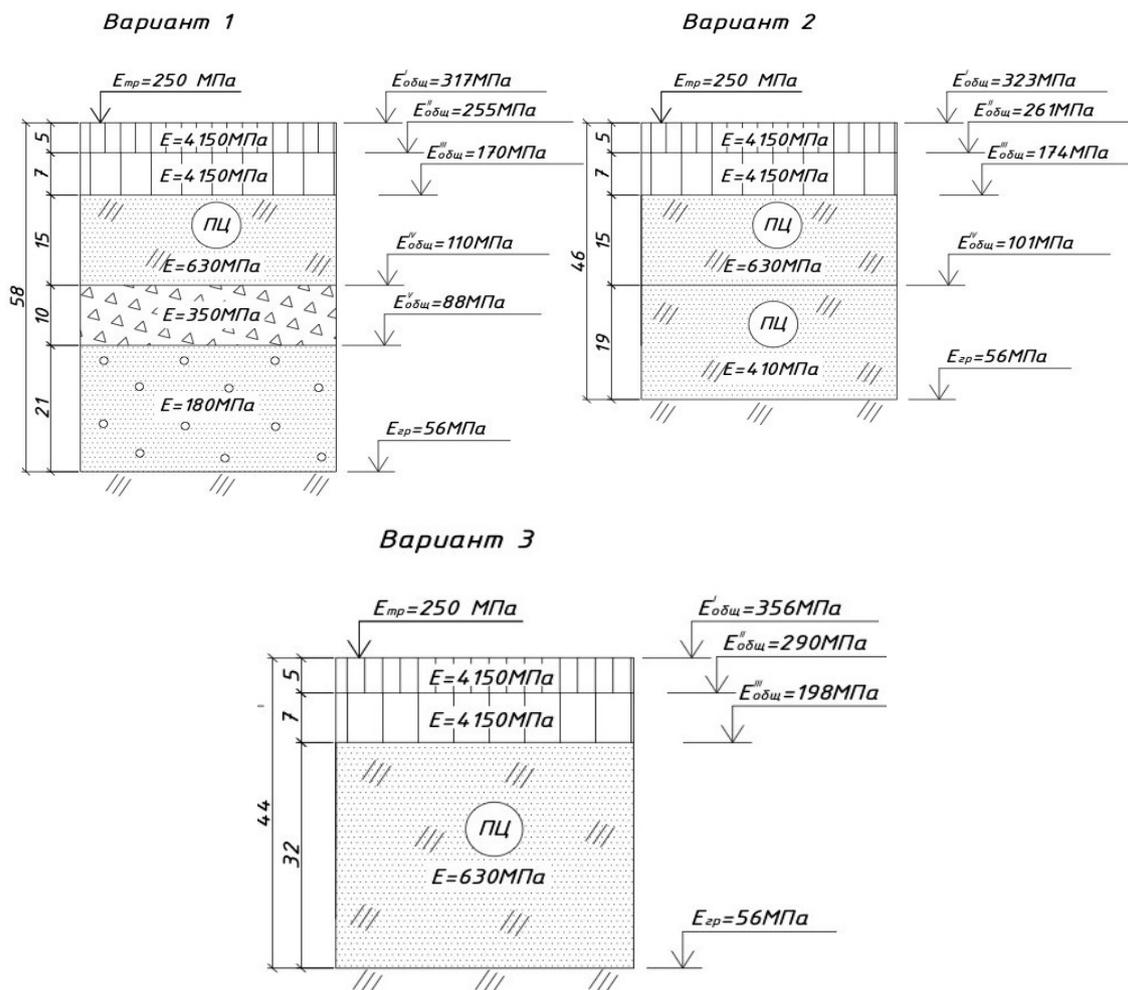


Рис. 6. Разработанные варианты конструкций дорожных одежд со слоями из модифицированных цементогрунтов (иллюстрация авторов)
 Fig. 6. Developed options for road pavement designs with layers of modified soil-cement (illustration by the authors)

Полученные результаты конструирования и расчетов вариантов дорожных одежд со слоями из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с объемными алифатическими радикалами, показывают возможность повышения эффективности технологии укрепления грунтов, что соответствует научным подходам в исследованиях ученых [5, 8, 10]. Проводимые комплексные исследования по влиянию модификации кремнийорганическими соединениями с алифатическим радикалами повышенной молекулярной массы, в отличие от применяемых ранее кремнийорганических соединений с короткой углеводородной цепью [18, 19], будет способствовать расширению региональной сырьевой базы и продлению сроков службы автомобильных дорог.

Варианты конструкций дорожных одежд

№ варианта	Наименование слоев конструкций дорожных одежд
1 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, модифицированный ДТЭС, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,15 м; 4) Технологический слой из щебня М600 по ГОСТ 32703 – 0,10 м; 5) Песчано-гравийная смесь по ГОСТ 23735 – 0,21 м
2 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, модифицированный ДТЭС, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,15 м; 4) Цементогрунт, модифицированный ДТЭС, соответствующий марке М20 по ГОСТ 23558 – 0,19 м
3 вариант	1) Асфальтобетон А16Вн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,05 м; 2) Асфальтобетон А22Нн по ГОСТ Р 58406.2 на битуме марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133 – 0,07 м; 3) Цементогрунт, модифицированный ДТЭС, соответствующий марке М40 по ГОСТ 23558 – 0,32 м

4. Заключение

1. На основе выявленных зависимостей влияния кремнийорганических соединений с алифатическим радикалами повышенной молекулярной массы, способствующих росту уровней физико-механических и расчетных характеристик цементогрунтов, разработаны конструкции дорожных одежд IV технической категории облегченного типа со слоями из модифицированных укрепленных грунтов.

2. Установлено, что додецилтриэтоксисилан является наиболее эффективным модификатором с точки зрения повышения прочностных показателей и морозостойкости в цементогрунтах по сравнению с изо-бутилтриэтоксисиланом и октилтриэтоксисиланом. Повышение молекулярной массы алифатического радикала обеспечило повышение уровня физико-механических свойств при меньшем содержании модификаторов в составе укрепленных грунтов.

3. При оптимизации модифицированных цементогрунтов получены марки по прочности М20, М40 и М60 и морозостойкости F10 и F15. Модификация кремнийорганическими соединениями в исследуемом ряду обеспечивает повышение физико-механических свойств цементогрунтов при оптимальном количествах модификаторов: изо-бутилтриэтоксисилана – 0,3 %; октилтриэтоксисилана – 0,06 %; додецилтриэтоксисилана – 0,04 %.

4. Определены расчетные характеристики модифицированных цементогрунтов. Установлено, что модификация цементогрунтов додецилтриэтоксисиланом обеспечивает: повышение модуля упругости на 44-64 %; предела прочности на растяжение при изгибе на 33-131 %. Объемная плотность модифицированных цементогрунтов составила: 1700-1740 кг/м³.

5. Показана возможность проектирования конструкций дорожных одежд со слоями из цементогрунтов, модифицированных кремнийорганическими соединениями с объемными алифатическими радикалами, применение которых будет способствовать расширению региональной сырьевой базы и продлению сроков службы автомобильных дорог.

Список литературы/References

1. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2022. No. 8. P. 129. DOI: 10.1007/s41062-023-01098-6.
2. Zolotukhin S.N., Andreev A.V., Volokitin V.P. Non-firing materials using clay soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 962. P. 022030. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022030.
3. Plyuta K. Determination of the percentage of lime in the strengthening of clay soils using pH. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 667. P. 012079. DOI: 10.1088/1757-899X/667/1/012079.
4. Sasanian S. The behavior of cement stabilized clay at high water contents // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – Ontario: The School of Graduate and Postdoctoral Studies The University of Western Ontario. – London, 2011. – 82 p.
5. Kuyukov S., Testeshev A., Zhigailov A., Shmatok V. Evaluation of the effectiveness of the soil-cement with hydrophobized surface for road construction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1614. P. 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012007.
6. Shepelev I.I., Eskova E.N., Potapova S.O., Khizhnyak S.V., Bochkov N.N. Ecological aspects of technogenic material application in road construction technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. No. 315. P. 052019. DOI: 10.1088/1755-1315/315/5/052019.
7. Nguyen H.-S., Adachi Y., Kizuki T., Maeba H., Inazumi S. (2020) Integration of information and communication technology (ICT) into cement deep mixing method. *International Journal of GEOMATE*. 2020. No. 19(74). P. 194–200. DOI: 10.21660/2020.74.9329.
8. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 817(1). P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
9. Berdov G.I., Mashkin N.A. Perspective directions in improvement of technology and construction materials based on mineral binders. *News of Universities. Construction*. 2015. No. 4. P. 45-56. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23762428_81096322.pdf.
10. Polyntsev E., Kvitko A. Using foam polyurethane sealers for strengthening of soils of a road bed of transport constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 832(1). P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012029.
11. Chong S.H. Development of constitutive model for simulation of cemented soil. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019. No. 37(5). P. 4635–4641. DOI: 10.1007/s10706-019-00903-3.
12. Cai Y., Xu L.R., Liu W.Z., Shang Y., Su N., Feng D. Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. No. 128. P. 105878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
13. Pinto V.R., Ikuma K. Effects of soil surface chemistry on adsorption and activity of urease from a crude protein extract: implications for biocementation applications. *Catalysts*. 2022. No. 12(2). P. 230. DOI: 10.3390/catal12020230.
14. Vdovin E., Bulanov P., Stroganov V., Mavliev L. Physical and mechanical characteristics of modified soil cement with polycarboxylate superplasticizers. *Proceedings of STCCE*. 2022. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. No. 291. P. 125-133. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7_10.
15. Huang G., Lin H., Li J., Liu J. Inducing hydrophobicity in saline soils: A comparison of hydrophobic agents and mechanisms. *Powder Technology*. 2023. No. 424. P. 118475. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118475.
16. Roshan K., Choobbasti A., Soleimani K., Fakhrabadi A. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised

- clayey sand. Cold Regions Science and Technology. 2021. No. 193(3). P. 103418. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
17. Khuziakhmetova K., Abdrakhmanova L., Nizamov R. Polymer mixtures based on polyvinyl chloride for the production of construction materials // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 169. – P. 14-21. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_2. – EDN TDMAAU.
18. Al-Kheetan M.J., Rahman M.M., Chamberlain D.A. Moisture evaluation of concrete pavement treated with hydrophobic surface impregnants. International Journal of Pavement Engineering. 2020. Vol. 21. 14. P. 1746-1754. DOI: 10.1080/10298436.2019.1567917.
19. Roshan K., Choobbasti A., Soleimani K., Fakhrabadi A. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand. Cold Regions Science and Technology. 2021. No. 193(3). P. 103418. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
20. Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V. Construction of road pavements using complex modified soil-cement. 2023. Construction of Unique Buildings and Structures. No. 109. P. 10927. DOI: 10.4123/CUBS.109.27
21. Vdovin, E.; Bulanov, P.; Stroganov, V.; Morozov, V. Complex modification of soil-cement for road pavements. 2023. Construction of Unique Buildings and Structures. No. 109. P. 10928. DOI: 10.4123/CUBS.109.28
22. Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Мавлиев Л.Ф. Гидрофобизация цементогрунтов для дорожных одежд: модификация, структура, технология и применение: Монография / Е.А. Вдовин, В.Ф. Строганов, Л.Ф. Мавлиев. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2023. – 204 с. [Vdovin E.A., Stroganov V.F., Mavliev L.F. Hydrophobization of soil-cement for road pavements: modification, structure, technology and application: Monograph / E.A. Vdovin, V.F. Stroganov, L.F. Mavliev. - Kazan: KSUAE publishing house, 2023. - 204 с.]

Информация об авторах

Вдовин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: vdovin007@mail.ru

Буланов Павел Ефимович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru

Строганов Виктор Федорович, доктор химических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: svf08@mail.ru

Information about the authors

Evgeniy A. Vdovin, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin007@mail.ru

Pavel E. Bulanov, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru

Viktor F. Stroganov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: svf08@mail.ru

Журнал «Известия КГАСУ» выходит 4 раза в год, тиражом 500 экз. Журнал является подписным изданием и включен в подписной каталог ГК «Урал - Пресс», индекс издания – 36939.

Авторы, являющиеся членами редакционной коллегии и (или) подписчиками журнала, имеют преимущественное право на опубликование своих статей.

Научные статьи в полном объеме также размещаются на официальном сайте журнала Известия КГАСУ <http://izvestija.kgasu.ru>. Электронное периодическое издание (ЭПИ) <http://izvestija.kgasu.ru> (Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.).

СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.

Все материалы направлять по адресу:

420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, комн. 79

Отдел Информационно-аналитического сопровождения НИР

Телефон (843) 510-46-39

Email: patent@kgasu.ru.

Известия КГАСУ
2024г., № 1(67)

Гл. редактор: Низамов Р. К.
Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Макет и редактирование: Чухлова М.Б.

Адрес редакции: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79
Тел. для справок: (843) 510-46-39
Адрес издателя: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Электронное периодическое издание: <http://izvestija.kgasu.ru>
Регистр. Эл. № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.

Подписной каталог ГК Урал-Пресс
Индекс издания – 36939

Распространение: свободная цена

Подп. к печати 02.04.2024	Формат 60×84/8
Заказ № 35	Бумага тип. №1
Усл.-печ. л 27,2	Уч.-изд. л. 25,1
Тираж 500 экз.	
I завод – 100	

Дата выхода в свет: 03.04.2024г.

Отпечатано в Издательстве КГАСУ: 420043, Республика Татарстан, г. Казань,
ул. Зеленая, д. 1