



# **NEWS**

**Kazan**  
**S**tate  
**U**niversity  
**A**rchitecture  
**E**ngineering

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., № 2(68)

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;  
Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;  
Горячев М.Г., д-р техн. наук, проф.;  
Есаулов Г.В., д-р арх., проф., академик РААСН;  
Ильичев В.А., д-р техн. наук, проф., первый вице-президент РААСН;  
Каюмов Р.А., д-р физ.-мат. наук, проф.;  
Кичигин В.И., д-р техн. наук, проф.;  
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;  
Кочев А.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;  
Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.;

Мирсаяпов Илизар Т., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН;  
Мирсаяпов Илшат Т., д-р техн. наук, проф.;  
Стрелков А.К., д-р техн. наук, проф.;  
Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф., почетный член РААСН;  
Сулейманов А.М., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ;  
Тунакова Ю.А., д-р хим. наук, проф.;  
Углова Е.В., д-р техн. наук, проф.;  
Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;  
Шагидуллин Р.Р., д-р хим. наук, чл.-корр. АН РТ;  
Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Рольф Катценбах, д-р техн. наук, проф. (Германия);  
Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);  
Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);  
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, № 2(68)**

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;  
Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;  
Goriachev M.G., Dr. tech. sci., prof.;  
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the  
Academy of RAACS;  
Illichev V.A., Dr. tech. sci., prof., First Vice  
President of RAACS;  
Kayumov R.A., Dr. phys-mat. sci., prof.;  
Kichigin V.I., Dr. tech. sci., prof.;  
Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;  
Kochev A.G. Dr. tech. sci., prof. corr.-m. RAACS;  
Logachev K.I., Dr. tech. sci., prof.;

Mirsayapov Ilizar T., Dr. tech. sci., prof. corr.-m.  
RAACS;  
Mirsayapov Ilshat T., Dr. tech. sci., prof.;  
Strelkov A.K., Dr. tech. sci., prof.;  
Stroganov V.F., Dr. chem. sci., prof., honorary m.  
of RAACS;  
Suleimanov A.M., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT;  
Tunakova Iu.A., Dr. chem. sci., prof.;  
Uglova E.V., Dr. tech. sci., prof.;  
Khozin V.G., 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);  
Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of  
EAS, foreign member of RAACS (Israel);

Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);  
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, 25<sup>th</sup>, 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



<b>ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ</b>	
<b>Кочарьянц К.В., Тисленко И.Н.</b> Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи	6
<b>Уваров В.А., Кочев А.Г., Соколов М.М.</b> Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского	17
<b>Степанов И.О., Крайнов Д.В.</b> Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении	26
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ</b>	
<b>Тлявлана Г.В., Макаров К.Н., Тлявлин Р.М., Емельянова Г.А.</b> Устойчивость элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамических воздействиях морских волн	37
<b>Бессонова В.Ю.</b> Влияние термостатирования асфальтобетонной смеси и механических нагрузок на прочность асфальтобетона	54
<b>Максимов В.А., Ушаков В.В.</b> Требования к герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий автомобильных дорог	66
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ</b>	
<b>Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Ганеева Ю.М.</b> Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности	77
<b>Абдрахимов В.З.</b> Влияние золошлаковой смеси на технические показатели с использованием регрессивного анализа и фазовый состав керамического кирпича	92
<b>СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Каюмов Р.А., Хайруллин Л.Р., Гилязитдинов Р.Ф.</b> Об одном варианте энергетического метода решения задачи устойчивости балок	105
<b>Серазутдинов М.Н.</b> Определение перемещений балки с трещиной с использованием теории стержней	114
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ</b>	
<b>Мирсаяпов Илшат.Т., Гайнэтдинов Р.Г., Салимзянов И.Р.</b> Узлы сопряжения железобетонных колонн с фундаментами	124
<b>Шарынин Б.Э.</b> Численное моделирование отдельных видов стандартных испытаний соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах	136
<b>ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА</b>	
<b>Ермошин Н.А., Борисов В.А.</b> Моделирование условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования	147
<b>ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ</b>	
<b>Мусабиров Т.А., Закирова Ю.А.</b> Предпосылки развития точек роста Казанской агломерации	159
<b>Портной Е.Е., Малков И.Г.</b> Модель «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология» при реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий	170
<b>Хафизов П.С., Закирова Ю.А.</b> Особенности редевелопмента промышленных и коммунальных зон города Альметьевск	180
<b>АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ</b>	
<b>Давлетьянова Г.Р., Давлетьянова К.Р., Троепольская Н.Е., Валиуллин А.А., Нураев Т.Р.</b> От спортивного праздника к городскому наследию: бульвар «Фестивальный» в городе Казань	193
<b>Сергин Д.В., Прокофьев Е.И.</b> Тенденции развития бионического подхода в архитектуре	205
<b>ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ</b>	
<b>Сайфуллина Л.Ш., Сиразеев Н.Р.</b> Советская монументальная скульптура в городском пространстве Казани	221
<b>Ганнам М.Я., Прокофьев Е.И.</b> Исторический обзор характера игровых видов спорта и их архитектурных объектов в странах Древнего мира	243
<b>Айдарова Г.Н.</b> Башня Сююмбике: стилистические особенности в контексте романо-итальянских, сельджукских, арабо-мамлюкских влияний и булгаро-татарских традиций	253
<b>Персова С.Г., Сиразеев Н.Р.</b> Колокольня Ф. И. Петонди в структуре ансамбля Кизического Введенского монастыря г. Казани	269
<b>Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»</b>	283



# CONTENTS



<b>HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS AND LIGHTING</b>	
<b>Kocharyant K.V., Tislenko I.N.</b> Experimental investigations of a non-isothermal air jet	6
<b>Uvarov V.A., Kochev A.G., Sokolov M.M.</b> Numerical study of air convection flow in the Church of the Holy Blessed Prince Alexander Nevsky	17
<b>Stepanov I.O., Kraynov D.V.</b> Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring	26
<b>DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS</b>	
<b>Tlyavlina G. V., Makarov K.N., Tlyavlin R.M., Emelianova G.A.</b> Stability of the fastening elements of the slopes of transport structures under the hydrodynamic effects of sea waves	37
<b>Bessonova V.Yu.</b> The influence of temperature control of asphalt concrete mixture and mechanical loads on the strength of asphalt concrete	54
<b>Maksimov V.A., Ushakov V.V.</b> Requirements for sealing expansion joints of cement concrete pavements of highways	66
<b>BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS</b>	
<b>Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Ganeeva Y.M.</b> The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water demand cements	77
<b>Abdrakhimov V.Z.</b> Influence of ash and slag mixture on technical parameters using regressive analysis and phase composition of ceramic bricks	92
<b>CONSTRUCTION MECHANICS</b>	
<b>Kayumov R.A., Khayrullin L.R., Gilyazetdinov R.F.</b> On one variant of the energy method for solving the problem of beam stability	105
<b>Serazutdinov M.N.</b> Determination of movements of a beam with a crack using the theory of rods	114
<b>BUILDING STRUCTURES, HOUSES</b>	
<b>Mirsayapov Ilshat T., Gainetdinov R.G., Salimzyanov I.R.</b> Connections of Reinforced Concrete Columns with Foundations	124
<b>Sharynin B.E.</b> Numerical modeling of some types of standard tests for joints of wooden structures on nail plates	136
<b>TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION</b>	
<b>Ermoshin N.A., Borisov V.A.</b> Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment	147
<b>URBAN PLANNING, RURAL PLANNING</b>	
<b>Musabirov T. A., Zakirova Yu. A.</b> Prerequisites for the development of growth points of the Kazan agglomeration	159
<b>Partny E.Y., Malkov I.G.</b> The model "Safe reintegration of territories – a new ideology" in the rehabilitation of territories contaminated with radionuclides	170
<b>Khafizov P. S., Zakirova Yu. A.</b> Features of the redevelopment of industrial and communal areas of the city of Almetyevsk	180
<b>ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY</b>	
<b>Davletyanova G.R., Davletyanova K.R., Troepol'skay N.E., Valiullin A.A., Nugaev T.R.</b> From sports festival to urban heritage: "Festivalny" Boulevard in Kazan	193
<b>Seregin D. V., Prokofiev E.I.</b> Trends in development of the bionic approach in architecture	205
<b>ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY, HISTORICAL AND ARCHITECTUAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION</b>	
<b>Saifullina L.Sh., Sirazeev N.R.</b> Soviet monumental sculpture in the urban space of the city of Kazan	221
<b>Ghannam M. Ya., Prokofiev E.I.</b> Historical overview of the nature of team sports and their architectural structures in the countries of the Ancient World	243
<b>Aidarova G.N.</b> Syuyumbike Tower: Stylistic Features in the Context of Romanesque-Italian, Seljuk, Arab-Mamluk Influences and Bulgar-Tatar Traditions	253
<b>Persova S.G., Sirazeev N.R.</b> The bell tower of T. I. Petondi in the structure of the ensemble of the Kizichesky Vvedensky Monastery in Kazan	269
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	283



## Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи

К.В. Кочарьянц<sup>1</sup>, И.Н. Тисленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Арктос»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Расчет воздухораспределения - один из важнейших этапов проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха, от корректности которого во многом зависит формирование комфортного микроклимата. Большинство профильных специалистов осуществляют данный расчет с помощью инженерных методик. При этом использование методик различных авторов приводит к сильно отличающимся результатам. Цель работы: на основании экспериментальных исследований определить наиболее корректную методику расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально. Задачи исследования: анализ и сопоставление расчетных формул наиболее часто применяемых методик для расчета неизотермических струй; проведение экспериментальных исследований приточной струи в неизотермических условиях на стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос» при различных параметрах на истечении; сравнение скорости, температуры и траектории приточных струй с результатами расчетов по инженерным методикам; анализ полученных результатов. На основании проведенного исследования установлено, что ни одна из общепринятых инженерных методик не позволяет корректно определить параметры неизотермической струи. Следовательно, необходимо проведение дальнейших исследований и совершенствование методов расчета воздухораспределения неизотермическими струями.

**Ключевые слова:** вентиляция, воздухораспределение, приточная струя, воздушное отопление, геометрическая характеристика, критерий Архимеда

**Для цитирования:** Кочарьянц К.В., Тисленко И.Н. Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 6-16, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.1, EDN: BBEPSR

## Experimental studies of a non-isothermal air jet

K.V. Kocharyantc<sup>1</sup>, I.N. Tislenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LLC "Arktos",

St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** The calculation of air distribution is one of the most important stages in the design of ventilation and air conditioning systems, the correctness of which largely determines the formation of a comfortable microclimate. Most subject matter experts carry out this calculation using engineering methods. At the same time, the use of methods by different authors leads to very different results. The purpose of the work: based on experimental studies, to determine the most correct method for calculating air distribution by non-isothermal jets supplied horizontally. Research objectives: analysis and comparison of calculation formulas of the most commonly used methods for calculating non-isothermal jets; conducting experimental studies of the supply jet in non-isothermal conditions at the stand of the scientific research laboratory of Aerodynamics and acoustics of the Arktos plant at various parameters at the outlet; comparing the speed, temperature and trajectory of the supply jets with the results of calculations using

engineering methods; analysis the results obtained. Based on the conducted research, it was found that none of the generally accepted engineering methods allows correct determination of the parameters of a non-isothermal jet. Therefore, it is necessary to conduct further research and improve methods for calculating air distribution by non-isothermal jets.

**Keywords:** ventilation, air distribution, supply jet, air heating, geometric characteristic, Archimedes' criterion

**For citation:** Kocharyant K.V., Tislenko I.N. Experimental investigations of a non-isothermal air jet // News KSUAE, 2024, 2024, № 2(68), p. 6-16, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.1, EDN: BBEPSR

## 1. Введение

В последнее время все большее внимание уделяется поддержанию комфорtnого микроклимата в помещениях различного назначения [1-3]. Для его достижения требуется уже на этапе проектирования систем вентиляции уметь прогнозировать значения температуры и скорости воздуха в обслуживаемой зоне помещения [4-6]. Наиболее совершенным методом определения параметров микроклимата в настоящее время является численное моделирование процессов воздухораспределения [7-9], осуществляющееся методами вычислительной гидродинамики [10-12]. Однако высокая стоимость и сложность применения данного метода делает его малодоступным в практике проектирования систем вентиляции. Поэтому основным способом прогнозирования параметров микроклимата остается применение инженерных методик.

В настоящий момент основным нормативным документом для проектировщиков систем вентиляции является СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», в приложении «Ж» которого представлена инженерная методика расчета воздухораспределения. Данная методика практически полностью заимствована из «Указаний по расчету и применению воздухораспределителей», которые разрабатывались специалистами научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики (НИЛАА) отечественного производителя воздухораспределителей завода «Арктос» на основе трудов советских [13, 14] и российских ученых [15, 16], а также на базе собственных исследований [17].

Как правило, методики расчета воздухораспределения разрабатываются на основе закономерностей развития приточных струй [18-20]. Наиболее сложным случаем является развитие неизотермических струй, которые применяются для воздушного отопления или кондиционирования воздуха [21, 22]. Основными авторами, описывающими поведение неизотермических струй, являются д.т.н. М.И.Гримитлин и д.т.н. И.А.Шепелев (формулы которого используются в методике СП 60.13330.2020). Характеристик струи, рассчитанные по различным методикам, в том числе указанных авторов, имеют кардинально отличающиеся значения. При этом авторы используют в формулах различные параметры, что затрудняет сравнительный анализ их подходов к развитию неизотермических приточных струй.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основании экспериментальных исследований выявить наиболее корректную методику расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально.

Задачами исследования являются:

- анализ и сопоставление формул наиболее часто применяемых методик для расчета неизотермических струй;

- проведение экспериментальных исследований приточной струи в неизотермических условиях на стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос» при различных параметрах на истечении;

- сравнение скорости, температуры и траектории приточных струй с результатами расчетов по инженерным методикам;

- анализ полученных данных.

## 2. Материалы и методы

На первом этапе описываемой работы авторами статьи был проведен анализ методик различных авторов, предлагаемых для расчета параметров неизотермической струи, а именно: траектории, максимальной скорости и избыточной температуры на различных расстояниях от истечения.

В [13] компактные неизотермические струи, называемые автором компактными воздушными фонтанами, предлагается описывать с помощью комплекса величин, имеющего размерность длины, называемого автором геометрической характеристикой:

$$H = \sqrt{\frac{m^2}{n} \frac{T_{окр}}{g} \frac{V_0^2 \sqrt{F_0}}{\Delta T_0}} \quad (1)$$

где  $m$  – кинематический коэффициент;  $n$  – температурный коэффициент;  $T_{окр}$  – температура окружающего воздуха;  $\Delta T_0 = T_0 - T_{окр}$  – избыточная температура воздуха в момент истечения;  $T_0$  – температура воздуха на истечении;  $F_0$  – расчетная площадь воздухораспределителя;  $V_0 = L/F_0$  – скорость воздуха в расчетном сечении, здесь  $L$  – объемный расход приточного воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения.

В [14] для описания неизотермической струи используется безразмерный комплекс величин, называемый критерием Архимеда  $Ar_0$ , отнесенными к условиям на истечении:

$$Ar_0 = g \frac{\sqrt{F_0} \Delta T_0}{V_0^2 T_{окр}} \quad (2)$$

Кроме того в [14] используется текущий критерий Архимеда для осесимметричных и веерных струй, зависящий от расстояния от истечения  $x$ :

$$Ar_x = \frac{n}{m^2} Ar_0 \left( \frac{x}{\sqrt{F_0}} \right)^2 \quad (3)$$

Сравнивая (1) с (2) и (3) можно получить следующие соотношения между критериями Архимеда и геометрической характеристикой компактной струи:

$$Ar_0 = \frac{m^2}{n} \frac{F_0}{H^2} \quad (4)$$

$$Ar_x = \left( \frac{x}{H} \right)^2 \quad (5)$$

Геометрическая характеристика и критерий Архимеда используются различными авторами для определения траектории струи.

В [13] выводится следующая формула для траектории струи  $y(x)$ , т.е. для зависимости вертикальной координаты оси струи  $y$  от горизонтальной координаты оси струи  $x$ :

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{n}{3m^2} \frac{g}{T_{окр}} \frac{\Delta T_0}{V_0^2 \sqrt{F_0}} \frac{x^3}{\cos^3 \alpha} = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{x^3}{3H^2 \cos^3 \alpha} \quad (6)$$

Необходимо отметить, что формула (6) используется в методике СП 60.13330.2020.

В более поздней работе [14] приводится формула для траектории неизотермической струи при горизонтальной подаче:

$$\frac{y}{\sqrt{F_0}} = 0,6 \frac{n}{m^2} Ar_0 \left( \frac{x}{\sqrt{F_0}} \right)^3 \quad (7)$$

Сравним формулы (6) и (7). Для горизонтальной подачи ( $\alpha = 0^\circ$ ) формула (6) примет вид

$$y = \frac{n}{3m^2} \frac{g}{T_{окр}} \frac{\Delta T_0 x^3}{V_0^2 \sqrt{F_0}} \quad (8)$$

После подстановки выражения (2) в (7) получим

$$y = 0,6 \frac{n}{m^2} \frac{g\Delta T_0}{T_{окр} V_0^2} \frac{x^3}{\sqrt{F_0}} \quad (9)$$

Сравнивая формулы (8) и (9), приходим к следующему выражению:

$$y = \frac{x^3}{\sqrt{F_0}} \frac{n}{m^2} \frac{g\Delta T_0}{T_{окр} V_0^2} \times \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{Шепелев И. А.} \\ 0,6 & \text{Гримитлин М. И.} \end{cases} \quad (10)$$

Из (10) следует, что значения вертикального отклонения неизотермической компактной струи при горизонтальной подаче, вычисленные по формулам (6) и (7) различаются в 1,8 раз. Такое значительное отличие никак не комментируется в профильной литературе, что выглядит довольно странно, учитывая широкое применение неизотермических приточных струй в вентиляции. При этом в [16] приведено следующее выражение для определения траектории компактных и веерных струй

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + 0,47 \frac{x^3}{3H^2 \cos^3 \alpha} \quad (11)$$

Из сравнения (11) с (10) следует, что для горизонтальной струи формула (11) дает значение  $y$ , равное среднему арифметическому значений, получаемых по формулам (6) и (7).

В свою очередь, автор [15], раскладывая в ряд решение выведенной им системы уравнений, описывающей траекторию неизотермической компактной струи, оставляет 4 первых члена ряда:

$$y \approx \bar{t} \sin \alpha + \frac{\bar{t}^3}{3} + \frac{\sin \alpha}{12} \bar{t}^5 + \frac{41 + \cos 2\alpha}{2520} \bar{t}^7 \quad (12)$$

где  $\bar{y} = \frac{y}{H}$ ,  $\bar{t} = \frac{x}{H \cos \alpha}$ .

При этом в [15] показано, что приближенное решение (12) мало отличается от численного решения системы уравнений при  $-30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Сравнивая (12) с (6), получаем, что формула (6), приводимая автором [13], представляет собой два первых члена приближенного выражения (12). Таким образом, из [15] следует, что формула (6) – это довольно грубое приближение решения системы уравнений.

Рассмотрим подходы различных авторов для определения значений максимальной скорости по длине неизотермической струи.

В [13] предлагается уравнение для расчета максимальной скорости движения воздуха на оси компактной неизотермической струи, подаваемой под углом  $\alpha$  к горизонту:

$$V_x = \frac{mV_0 \sqrt{F_0} \cos \alpha}{x} \sqrt{\cos^2 \alpha + \left[ \sin \alpha + \left( \frac{x}{H \cos \alpha} \right)^2 \right]^2} \quad (13)$$

Такая же формула, выраженная через коэффициент неизотермичности  $K_n$ , указана и в [16] и приводится в СП 60.13330.2020.

Из анализа (13) следует, что для изотермической струи  $\Delta T_0 = 0$ , следовательно, учитывая (1),  $H = \infty$ . При этом подкоренное выражение (13) в силу основного тригонометрического тождества становится равным единице. В этом случае формула (13)

с учетом наклонной подачи трансформируется в стандартную формулу для изотермической компактной струи, являющуюся определением кинематического коэффициента  $m$ , что логично и не вызывает сомнений:

$$V_x = \frac{m V_0 \sqrt{F_0}}{x} \quad (14)$$

Теперь рассмотрим (13) на больших расстояниях  $x \gg H$ . При этом подкоренное выражение становится прямопропорциональным  $x^4$ . Следовательно, значение  $V_x$  пропорционально  $x$ . Таким образом, из (13) следует, что скорость компактной неизотермической струи на расстояниях  $x \gg H$  неограниченно возрастает с расстоянием независимо от всех прочих параметров. Такой вывод вызывает сомнения и требует уточнения.

При подаче воздуха под углами, близкими к вертикальной подаче  $\cos \alpha \rightarrow 0$ , откуда следует, что подкоренное выражение (13) становится обратнопропорциональным  $\cos^4 \alpha$ . Следовательно, значение  $V_x$  обратнопропорционально  $\cos \alpha$ , т.е.  $V_x \rightarrow \infty$ . Таким образом, формула (13) приводит к неверным результатам при подаче воздуха под углами, близкими к вертикальной подаче, что также требует уточнения.

Также следует отметить, что автор [14], ссылаясь на данные экспериментов, предлагает  $V_x$  горизонтальных неизотермических струй определять по формулам изотермических струй. Данное утверждение противоречит уравнению (13).

Итак, проведенный анализ показал, что приведенное в СП 60.13330.2020 уравнение для определения максимальной скорости по длине неизотермической струи требует уточнения или, как минимум, определения области его применимости.

На втором этапе работы, с целью разрешения выявленных противоречий и совершенствования инженерных методик расчета воздухораспределения авторами была проведена серия натурных экспериментов по определению параметров неизотермической приточной струи, подаваемой горизонтально.

Исследования проводились на стенде НИЛАА завода «Арктос», представляющего собой помещение размерами  $20 \times 12 \times 10$  м и предназначенного для измерений приточных струй в свободных условиях, исключающих стеснение струи. Для формирования приточной струи была собрана экспериментальная установка, включающая в себя: вентилятор, нагреватель, управляемый лабораторным автотрансформатором (380 В), выравнивающее устройство, воздуховод диаметром 100 мм, из которого нагретая струя горизонтально подавалась в помещение (рис.1). В процессе измерений определялись следующие величины: температура  $T_0$  и скорость  $V_0$  воздуха в воздуховоде перед истечением, температура окружающего воздуха  $T_{окр}$ , максимальные значения скоростей  $V_x$  и температур  $T_x$  воздуха в струе, а также определялась вертикальная координата оси струи  $y$ , отсчитываемая от центра выпускного отверстия. Параметры струи измерялись с помощью термоанемометрической системы, включающей 8 сферических датчиков (подробнее про систему см. [23]).



Рис. 1. Демонстрация развития приточной нагретой струи (иллюстрация авторов)  
Fig. 1. Demonstration of the flow of the supply heated jet (illustration by the authors)

Измерения струи проводились в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ Р ЕН 12238-2012. «Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для перемешивающей вентиляции». При этом проводились замеры полей скорости и температуры в вертикальных сечениях на различных расстояниях  $x$  от истечения. В каждом сечении определялась вертикальная координата  $y$  точки с максимальными значениями скорости  $V_x$  и температуры  $T_x$ . Таким образом, определялась траектория струи  $y(x)$ .

Исходные параметры струи для экспериментальных исследований выбирались таким образом, чтобы охватить наиболее широкий диапазон значений геометрической характеристики  $H$ , охватывающий большинство случаев, встречающихся в практике проектирования. Согласно формуле (10), преобразованной к виду

$$y = \frac{x^3}{3H^2} \times \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{Шепелев И. А.} \\ 0,6 & \text{Гримитлин М. И.} \end{cases} \quad (15)$$

следует, что зависимость траектории неизотермической струи от  $V_0$ ,  $\Delta T_0$ ,  $T_{окр}$ ,  $F_0$ ,  $m$  и  $n$  определяется одним параметром – геометрической характеристикой  $H$ . Таким образом, значения  $V_0$  и  $\Delta T_0$  для экспериментальных исследований подбирались так, чтобы получить различные  $H$  (таблица 1). Кроме того, две серии замеров были проведены при практически одинаковых  $H$ , но различающихся  $V_0$  и  $\Delta T_0$ , для того чтобы проверить указанное выше утверждение.

Таблица 1

## Исходные данные экспериментального исследования

№ эксперимента	$H$ , м	$V_0$ , м/с	$T_{окр}$ , К	$\Delta T_0$ , К
1	1,35	1,7	292	30,5
2	2,76	3,6	290	34,3
3	3,46	3,4	288	19,5
4	7,37	7,0	290	18,2
5	7,34	5,4	292	10,8
6	13,7	9,8	290	10,1

## 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены траектории горизонтально подаваемой нагретой приточной струи, полученные по результатам эксперимента и рассчитанные по формуле (15). На рис. 4. представлены максимальные скорости струи, измеренные в эксперименте и рассчитанные по формулам (13 и 14).

На рис. 5 представлены избыточные температуры струи  $\Delta T_x = T_x - T_{окр}$ , полученные из эксперимента и рассчитанные по формуле, являющейся определением температурного коэффициента  $n$ :

$$\Delta T_x = \frac{n\Delta T_0 \sqrt{F_0}}{x} \quad (16)$$

При этом для компактной слабонеизотермической струи из формулы, предлагаемой в [13] Шепелевым И.А., следует, что температурный коэффициент принимает значение  $n = 6,2$ . Из формул, предложенных Гримитлиным М.И. в [14] для этого же случая, получается  $n = 5,6$ .

Анализ результатов эксперимента при одинаковых значениях  $H$ , но отличающихся  $V_0$  и  $T_0$  (табл. 1, рис. 2) подтверждает вывод о том, что зависимость траектории неизотермической струи от  $\Delta V_0$ ,  $\Delta T_0$ , определяется одним параметром – геометрической характеристикой  $H$ . Следует отметить, что независимость траектории от  $F_0$ ,  $m$  и  $n$  (при одинаковой  $H$ ) не была исследована в силу фиксированного значения диаметра воздуховода в экспериментальной установке. Таким образом, для однозначного подтверждения зависимости траектории только от  $H$  необходимо провести дополнительные исследования.

Траектория неизотермической приточной струи, полученная по результатам эксперимента (рис. 3), совпадает с рассчитанной по формуле (8) при  $2,7 \text{ м} < H < 14 \text{ м}$ .

Однако при  $H = 1,35$  м экспериментальная траектория проходит между траекториями, рассчитанными по формулам (8) и (9), и отстоит от них на 40%.

Максимальные скорости неизотермической приточной струи, полученные по результатам эксперимента (рис. 4), отличаются от рассчитанных по формуле (13) и совпадают с результатом формулы для изотермической струи (14).

Максимальные избыточные температуры приточной струи, полученные по результатам эксперимента (рис. 5), отличаются от рассчитанных по формуле (16). При  $H < 3$  м эти различия достигают 5 К, при  $H > 7$  м отличия около 0,5 К.

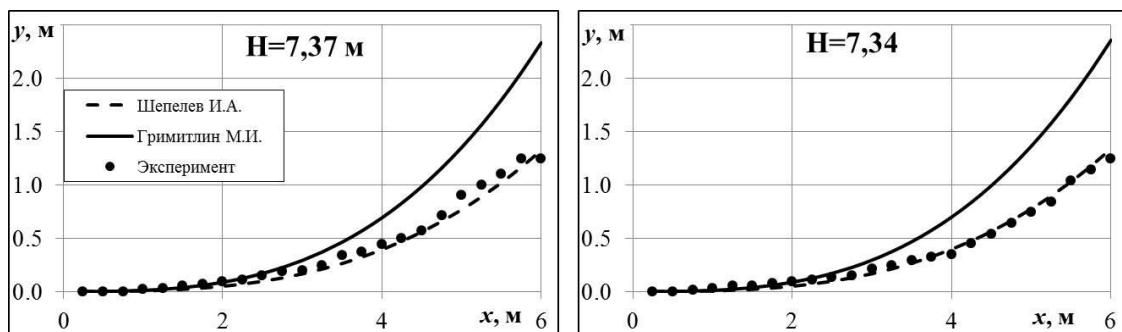


Рис. 2. Траектории приточной струи при одинаковых значениях  $H$  (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The trajectories of the supply jet at the same values of  $H$  (illustration by the authors)

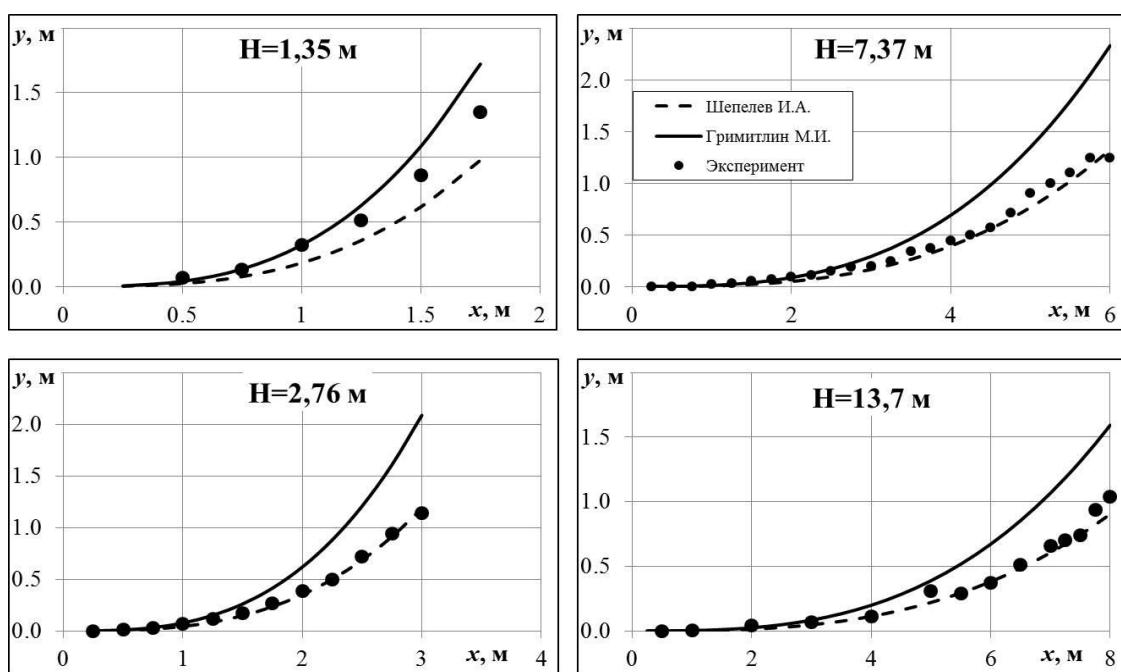


Рис. 3. Траектории приточной струи при различных значениях  $H$  (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Supply jet trajectories at different  $H$  values (illustration by the authors)

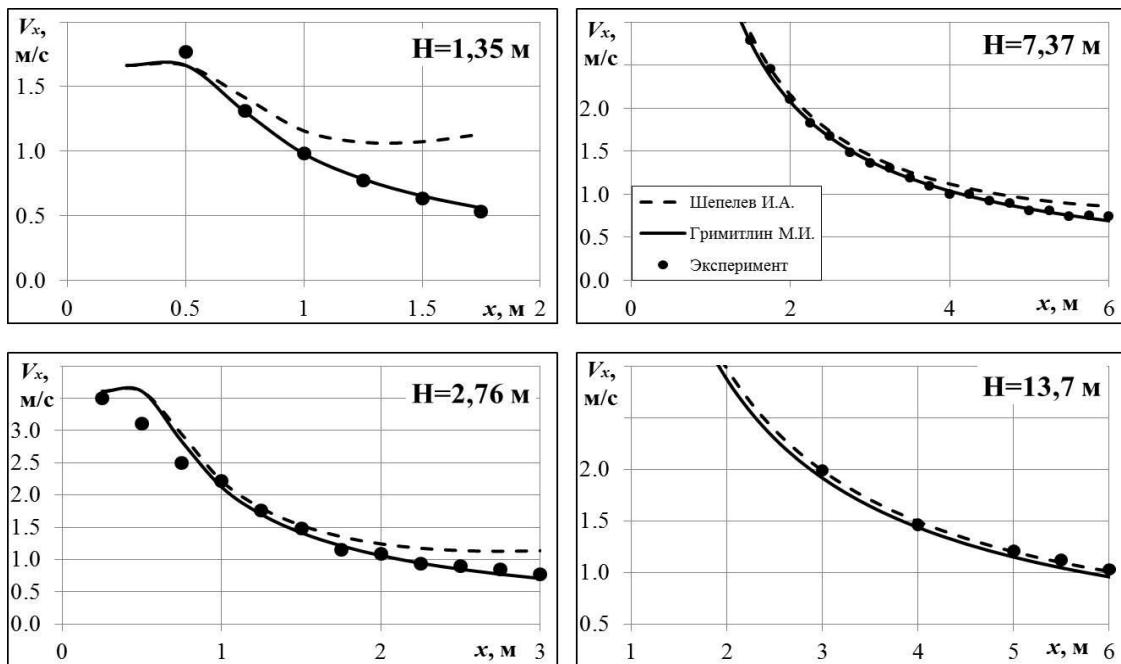


Рис. 4. Максимальные скорости приточной струи на расстоянии  $x$  от истечения (иллюстрация авторов)

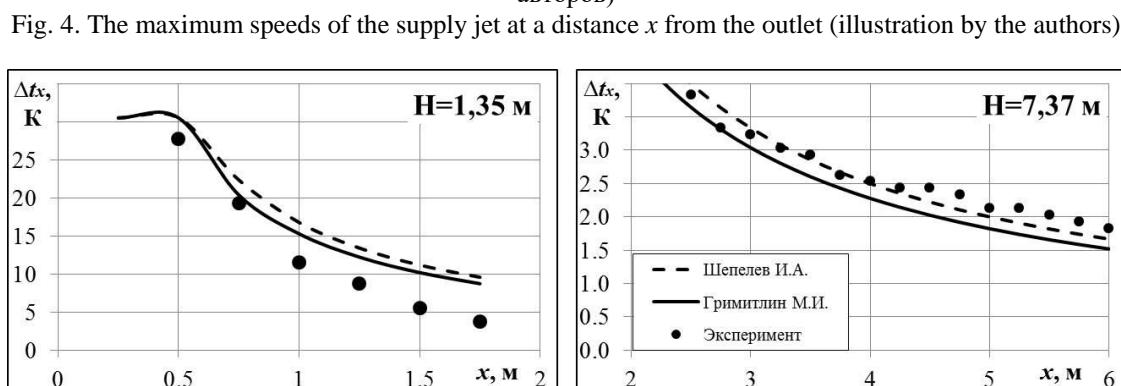


Рис. 5. Избыточные температуры приточной струи на расстоянии  $x$  от истечения (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Excessive temperatures of the supply jet at a distance  $x$  from the outlet (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

1. В результате проведенного анализа методик различных авторов выявлено существенное расхождение в получаемых результатах, в частности, высота подъема нагретой приточной струи, подаваемой горизонтально, различается в 1,8 раз.

2. Проведены экспериментальные исследования течения неизотермической приточной струи, подаваемой горизонтально, при различных параметрах на истечении. Несмотря на то, что отдельные расчеты по различным методикам частично подтвердились экспериментальными данными, полное описание развития

неизотермической струи не дает ни одна из общезвестных методик. Таким образом, необходимо совершенствование методики расчета неизотермических струй.

3. В результате анализа экспериментальных данных и сравнения их с результатами расчета по инженерным методикам:

- подтверждено, что зависимость траектории неизотермической струи от  $\Delta V_0$ ,  $\Delta T_0$ , определяется одним параметром – геометрической характеристикой  $H$ . Для подтверждения независимости траектории от параметров  $F_0$ ,  $m$  и  $n$  при одинаковых  $H$  необходимо провести дополнительные исследования, причем не только для отверстий других диаметров, но и для различных типов воздухораспределителей;

- установлено, что траектория струи при  $H > 2,7$  м хорошо описывается формулой (15). При  $H = 1,35$  м отклонения экспериментальных значений вертикальной координаты струи от рассчитанных по указанной формуле достигает 40%, что недопустимо. Следовательно, для сильонеизотермических струй требуется проведение дальнейших исследований и корректировка формулы;

- установлено, что скорости неизотермической струи, измеренные в эксперименте, совпадают с рассчитанными по формуле (14) для изотермической струи;

- определено, что избыточные температуры, полученные по результатам эксперимента для слабонеизотрмических струй при  $H > 7$  м, отличаются от рассчитанных по формуле (16) на 0,5 К. Для сильонеизотрмических струй при  $H < 3$  м эти отличия составляют 5 К. Таким образом для таких сильонеизотермических струй требуется корректировка формулы, для чего необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

4. Для совершенствования методики расчета воздухораспределения неизотермическими струями, подаваемыми горизонтально и под наклоном, необходимо продолжить экспериментальные исследования для различных форм и размеров приточных устройств и углов наклона подачи приточной струи.

### Список литературы

- Денсихина Д.М., Русаков С.В. Изменение параметров микроклимата в течение хоккейного матча в зале крытой ледовой арены // АВОК. 2019. №6. С.26-31. [D.M. Denisihina, S.V. Rusakov. Changes in the microclimate parameters during a Hockey Game in a covered Ice Arena // AVOK. 2019. №6. P.26-31].
- Walker I., Less B., Lozinsky C., Lorenzetti D., Casquero-Modrego N., Sohn M. Compartmentalization and Ventilation System Impacts on Air and Contaminant Transport for Multifamily Buildings // International Journal of Ventilation. April. 2024. DOI: 10.1080/14733315.2024.2333669
- Беляев К.В., Гарбарук А.В. Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме // АВОК. 2021. №7. С.60-65. [K. V. Belyaev, A. V. Garbaruk, D. A Nikulin, M. Kh.Strelets. Experience in optimizing air distribution and microclimate parameters in an Orthodox Church // AVOK. 2021. №7. P.60-65]
- Колубков А.Н., Авакян Ю.С. Устройство сети воздуховодов и организация воздухораспределения в горячих цехах предприятий общественного питания // АВОК. 2019. №7. С.38-40 [A. N. Kolubkov, Yu. S. Avakyan. Construction of air ducts network and air distribution arrangement in hot shops of public catering companies // AVOK. 2019. №7. P.38-40].
- Zhang S, Zhang X, Lin Z. Concept and ventilation performance demonstration of graded ventilation // Building and Environment. April. 2024. DOI:10.1016/j.buildenv.2024.111477.
- Palmowska, B. Lipska, Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 86. P. 373-387
- Shokofe, R.; Majid, A.; Hasan, M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation // Build. Environ. 2021. №204. 108165.

8. Зиганшин А.М., Тихонов К.С., Кареева Ю.Р. Численное определение характеристик течения через приточную решетку, расположенную за отводом. // Материалы XXI Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В. Н. Богословского «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». Волгоград: ВГМУ, 2023. С. 119–125. [Ziganthin A.M., Tikhonov K.S., Kareeva Yu.R. Numerical determination of flow characteristics through the supply hole located behind the elbow // Materials of the XXI International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of RAASN Academician V. N. Bogoslovsky "Indoor air and environment quality ", Volgograd: VGMU, 2023. P. 119-125].
9. Денисихина Д.М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата // Известия КГАСУ. 2023. № 4(66). С. 337-345. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_337, EDN: WFGUKM [Denisikhina D.M. Calculation of the air exchange coefficient based on CFD-simulation methods // News KSUAE. 2023. № 4(66). P. 337-345].
10. K. Khankari Computational Hydrodynamics Methods as a Tool for Assessment of Ventilation Energy Efficiency in Surgery Rooms Part 1. Air exchange speed. // ASHRAE Journal, vol. 60, no. 5, May 2018.
11. Grau-Bové J., Mazzei L., Strlic M., et al. Fluid simulations in heritage science // Heritage Science. 2019; 7(16). – DOI:10.1186/s40494-019-0259-9.
12. Зиганшин А.М., Агапитова А.А., Тихонов К.С. Постановка и валидация численного моделирования течения через приточную решетку – определение сопротивления // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: Материалы XX Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». Волгоград. ВолгГМУ. 2022. С. 80-86 [Ziganthin A.M., Agapitova A.A., Tikhonov K.S. Formulation and validation of numerical simulation of flow through a supply grate – determination of resistance // Materials of the XX International Scientific Conference "Indoor air and environment quality ", Volgograd: VGMU, 2022. P. 80-86].
13. Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещениях. Москва. Стройиздат, 1978 г. [Shepelev I. A. Aerodynamics of indoor air flows. Moscow. Stroyizdat, 1978]
14. Гrimitlin M. I. Распределение воздуха в помещениях. Санкт-Петербург. АВОК Северо-Запад, 2004. издание 3-е. [Grimitlin M. I. Indoor air distribution. Saint-Petersburg. AVOK North-West, 2004. edition 3].
15. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. Москва. АВОК-ПРЕСС, 2008 [Posokhin V. N. Aerodynamics of ventilation. Moscow. AVOC PRESS, 2008].
16. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Книга 1 и 2. Справочник проектировщика. Под редакцией к. т. н. Н. Н. Павлова и инж. Ю. И. Шиллера. Москва. Стройиздат. 1992 г. [Internal sanitary installations. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book 1 and 2. Designer's Handbook. Moscow. 1992].
17. Kocharyant K.B. Исследование зависимости скорости потока в обратном течении от типа приточного устройства // Электронный научный журнал «Фундаментальные исследования». 2017. №4. Ч.1. С. 39-43. Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41432> [Kocharyant K.V. Investigation of the dependence of the flow velocity in the reverse flow on the type of supply device // Electronic scientific journal "Fundamental Research". 2017. No.4. Part 1. P. 39-43].
18. H. Yamasawa, T. Kobayashi, T. Yamanaka, N. Choi, M. Koshida, M. Cehlin, A. Ameen Experimental Investigation on the velocity profile of supply flow in impinging jet ventilation system // IAQVEC 2023, the 11th international conference on indoor air quality, ventilation & energy conservation in buildingsAt: Tokyo, JapanVolume: 396. DOI:10.1051/e3sconf/202339602014.
19. Y. Li, W. Ji, F. Jiang, T.Yu, J. Zhou Investigation of the influence of jet supply configurations on the thermal and flow behaviors of the wall-attached night ventilation

- system // May 2022. Sustainable Cities and Society 83(10):103957. DOI:10.1016/j.scs.2022.103957.
20. W. Liu, M. Sandberg. The effects of room length on jet momentum flux // ROOMVENT. August 2022. E3S Web of Conferences 356(7):01001. DOI:10.1051/e3sconf/202235601001
21. Прот. Рябышев. О, Проныков М. А., Дорохов В. Б. Система воздушного отопления, совмещенная с вентиляцией в храме Казанской иконы Божьей Матери в селе Борисоглеб Владимирской епархии // АВОК. 2017. №2. С.34-40 [Protoiereus Oleg Ryabyshev, M. A. Pronkov, V. B. Dorohov. Combined air heating and ventilation system in the Cathedral of the Kazan Icon of the Mother of God in Borisogleb Village of Vladimir Eparchy // AVOK. 2017. №2. P.34-40].
22. Аржанников Р.Г., Беляев К.В., Гарбарук А.В., Никулин Д.А., Полунин Г.С., Стрелец М.Х. Опыт модернизации системы воздушного отопления для сохранения объекта культурного наследия: храм Спаса на Крови в Санкт-Петербурге // АВОК. 2024. №2. С.42-46. [R. G. Arzhanikov, K. V. Belyaev, A. V. Garbaruk, D. A. Nikulin, Experience in Modernization of an air heating system for preservation of a cultural heritage site: Church of the Savior on Blood in Saint Petersburg // AVOK. 2024. №2. P.42-46]
23. Захарова Е. В., Кочарьянц К. В. Исследование быстрозатухающего высокотурбулентного потока, формируемого воздухораспределителем для ступенчатого пола // Научный журнал. 2018. № 3. С. 6-11 [Zakharova E. V., Kocharyantc K.V. Investigation of a fast-extinguishing highly turbulent flow formed by an air distributor for a stepped floor // Scientific Journal. 2018. No. 3. P. 6-11].

### Информация об авторах

**Кочарьянц Кристина Владимировна**, кандидат технических наук, директор по научной работе ООО «Арктос» г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: nin-kasi@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2801-5699

**Тисленко Иван Николаевич**, руководитель группы компьютерного моделирования ООО «Арктос» г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: tivanik@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6451-6303

### Information about the authors

**Kristina V. Kochariantc**, candidate of technical sciences, director of science, LLC «Arktos», Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: nin-kasi@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2801-5699

**Ivan N. Tislenko**, head of the computer modeling group, LLC «Arktos», Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: tivanik@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6451-6303

УДК: 726.5, 536.24

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.2

EDN: CPNKAW



## Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского

В.А. Уваров<sup>1</sup>, А.Г. Кочев<sup>1</sup>, М.М. Соколов<sup>1</sup><sup>1</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Православные храмы являются важной частью культурной жизни нашего общества, являясь визуальным отображением традиций нашего народа, именно поэтому так важно сохранить их в первозданном состоянии. Одним из ключевых факторов сохранения внутреннего убранства является создания в храме оптимальных параметров температурно-влажностного режима, для более глубоко понимание, которого необходимо изучение процессов развития полей скорости и температуры, возникающих во всей области православного храма.

В данной статье была поставлена цель изучить процессы развития полей скорости и температуры, возникающих во всей области православного храма, в рамках которой решались следующие задачи: исследовать выбранную модель на сеточную сходимость и верифицировать полученные результаты в ходе фактических измерений.

В данной статье приводятся экспериментальные данные и теоретические результаты, полученные в результате численного моделирования течения вызванного свободным конвективным теплообменом внутри православных храмов. Результаты разработанной модели оформлены в виде фреймворка «SAFHE» написанного по схеме Model-View-Controller на языке программирования Python.

**Результаты.** Представлены результаты расчета системы отопления с подоконными алюминиевыми радиаторами, проведенные с использованием разработанного фреймворка.

**Выводы.** Значения средней абсолютной процентной ошибки расчитанные в рамках верификации модели позволяют сделать вывод о довольно высокой точности представленного метода.

**Ключевые слова:** православные храмы, температурные условия, микроклимат, численное моделирование, системы отопления

**Для цитирования:** Уваров В.А., Кочев А.Г., Соколов М.М. Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 17-25, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.2, EDN: CPNKAW

## Numerical study of air convection flow in the Church of the Holy Blessed Prince Alexander Nevsky

V.A. Uvarov<sup>1</sup>, A.G. Kochev<sup>1</sup>, M.M. Sokolov<sup>1</sup><sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* Orthodox churches are an important part of the cultural life of our society, being a visual reflection of the traditions of our people, which is why it is so important to preserve them in their original condition. One of the key factors in preserving the

interior decoration is the creation of optimal temperature and humidity parameters in the church, for a deeper understanding of which it is necessary to study the processes of development of speed and temperature fields that arise in the entire area of the Orthodox church.

In this article, the goal was to study the processes of development of velocity and temperature fields arising in the entire area of the Orthodox church, within the framework of which the following tasks were solved: to study the selected model for grid convergence and to verify the results obtained during actual measurements.

The article presents experimental data and theoretical results obtained as a result of numerical modeling of the flow caused by free convective heat exchange inside Orthodox churches. The results of the developed model are presented in the form of the “SAFHE” framework written according to the MVC scheme in the Python programming language.

*Results.* The results of the calculation of the heating system with window sill aluminum radiators, carried out using the developed framework, are presented.

*Conclusions.* The average absolute percentage error (MAPE) values obtained as a result of verification allow us to conclude that the presented method is quite accurate.

**Keywords:** Orthodox churches, temperature conditions, microclimate, numerical modeling, heating systems

**For citation:** Uvarov V.A., Kochev A.G., Sokolov M.M. Numerical study of air convection flow in the Church of the Holy Blessed Prince Alexander Nevsky // News KSUAE, 2024, 2024, № 2(68), p. 17-25, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.2, EDN: CPNKAW

## 1. Введение

В Нижнем Новгороде расположено большое количество православных храмов, выполняющих существенную роль в жизни города и оставивших яркий след в истории нашей страны. Часть из них по праву можно называть памятниками православной культуры, так как они появились ещё во времена основания Нижнего Новгорода.

Сегодня, как и сотни лет назад, данные храмы являются важной частью культурной жизни нашего общества, являясь визуальным отображением верований, обычая и традиций нашего народа и способствуют формированию у граждан чувства идентичности в условиях глобализации и унификации культуры.

Именно поэтому, задачи сохранения православных храмов в их первозданном состоянии является важной составной частью общей государственной и общественной политики в области культуры.

При решении данных задач особое внимание стоит уделить причинам их возникновения, которые, в свою очередь, нужно рассматривать как комплекс антропогенных и природных факторов. Одним из таких факторов является необходимость создания в храме оптимальных параметров температурно-влажностного режима, способного обеспечить как сохранность внутреннего убранства, так и комфортные условия для прихожан и церковного клира.

Отсутствие контроля за данными параметрами неминуемо вызывает старение материалов, приводящее к изменению художественного образа как самого здания, так и находящихся внутри предметов, зачастую являющихся произведениями искусства.

В нашей стране в течении последних двадцати пяти лет было уделено большое внимание единым методам определения эксплуатационных характеристик и повышению уровня безопасности и степени соответствия православных храмов их функциональному назначению. Полученные в ходе данной работы результаты легли в основу существующей нормативной базы<sup>[1-3]</sup>, содержащей требования и руководства в части обеспечения расчетных параметров внутреннего воздуха в помещениях православных храмах.

Данные нормативные методики содержат различные примеры теплотехнических расчетов и рекомендации по проектированию систем отопления и вентиляции, теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций, основанных на использовании большого числа эмпирических расчетных величин, полученных для

установившихся режимов. Но в большинстве случаев реальные процессы являются нестационарными и неоднородными в пространстве, что подразумевает наличие важных локальных значений параметров микроклимата.

Примером важности таких параметров может выступить механизм выделения большого числа копоти в результате активного колебания пламени свечи вызванного воздействием сильного воздушного течения образующегося вблизи «теплого» пола молельного зала [1]. Или процесс почернения икон, фресок и других элементов внутреннего убранства вызванный интенсивным осаждением сажи, содержащейся в воздухе, в результате взаимодействия холодных безынерционных поверхностей с теплыми конвективными потоками [2].

Похожие процессы так же описаны в работах сотрудников Технического университета Георге Асачи во главе с Turcanu Florin-Emilian [3-5]. В них представлены исследования рассматривающие существующие системы отопления с целью анализа сильных и слабых сторон существующих систем отопления храмов, характеризующейся частым изменением температуры и влажности внутреннего воздуха, что в конечном итоге вызывает старение и разрушение как внутреннего убранства, так и самого помещения храма.

В качестве наиболее эффективного варианта решения представленных задач могут выступить современные методы вычислительной гидро-газодинамики, заключающиеся в подробном описание поведения рассматриваемой среды с помощью системы дифференциальных уравнений, позволяющих с высокой точностью определять локальные и интегральные параметры воздушных потоков и полей температуры, как в свободном объёме, так и на внутренних поверхностях [2, 7-9].

При разработке такой модели необходимо учитывать исторические особенности развития систем отопления в православных храмах, заключающиеся в использовании водяных и дымовоздушных систем с комбинированным панельно-лучистым и конвективным отоплением. При таких схемах на первый план в вопросе в формирования параметров микроклимата выходит естественная конвекция, для описания которой в большинстве случаев используются системы дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения Навье – Стокса, неразрывности и энергии [10]:

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{d\tau} - \frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yx}}{\partial y} - \rho X = 0 \\ \rho \frac{dv}{d\tau} - \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P_{yy}}{\partial y} - \rho Y = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \left( \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right) \\ \rho \frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\partial k}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + P_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + P_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + P_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $u, v$  – проекция скорости на оси  $x, y$  [ $m/c$ ];  $T$  – температура [ $K$ ];  $\rho$  – плотность [ $kg/m^3$ ];  $e$  – внутренняя энергия [ $Дж$ ];  $k$  – коэффициент теплопроводности [ $Bm/m \cdot K$ ];  $P_{xx}, P_{xy}, P_{yx}, P_{yy}$  – компоненты тензора напряжений;  $X, Y$  – проекция внешних сил на оси  $x, y$ .

Система уравнений (1) решалась численно путем сведения данной двумерной схемы к одномерной по принципу переменных направлений [11]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = (L_1 + L_2) \varphi + f, \quad (2)$$

где  $L_1, L_2$  – одномерные дифференциальные операторы.

$$\begin{cases} \left( E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_1 \right) \varphi^{n+1/2} = \left( E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_2 \right) \varphi^n + \tilde{f}^n \\ \left( E - \frac{\tau}{2} \tilde{L}_2 \right) \varphi^{n+1} = \left( E + \frac{\tau}{2} \tilde{L}_1 \right) \varphi^{n+1/2} + \tilde{f}^n \end{cases}, \quad (3)$$

Таким образом, целью исследования является изучение процессов развития полей скорости и температуры, возникающих во всей области православного храма, начиная от поверхности радиаторов и кончая основным объемом.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- исследование выбранной модели на сеточную сходимость;
- верификация полученных значений средней скорости и температуры на вертикальном разрезе по окну ограждающих конструкций и центре барабана.

С целью верификации полученных значений, данная задача так же была решена с использованием программного комплекса вычислительной гидро-газодинамики – ANSYS Fluent.

## 2. Материалы и методы

Расчетная область размером и формой представляет вертикальный разрез по окну ограждающих конструкций и центр барабана храма.

Решение представленной задачи было реализовано в виде фреймворка «SAFHE», написанного по схеме Model-View-Controller (MVC) на языке программирования Python. Данный модуль позволяет рассчитывать распределение параметров микроклимата в храмах и осуществлять анализ полученных результатов.

Схема расчетной области представлена на рис. 1. Границные условия данной конструкции:

- **AB, EF, HI, IJ, JK, KL, LM, NO, OP, PQ, QR, RS, ST, UV, VW, WX, XY, YZ, G<sub>1</sub>F<sub>1</sub>, F<sub>1</sub>E<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>A<sub>1</sub>, A<sub>1</sub>A** – «wall» – (непроницаемые стенки):  $TV^{Y-1} = const$ ,  $dv_n/dn = 0$ .
- **BC, CD, DE, BC, CD, DE** – «wall» – (горячие стенки (радиаторы отопления)):  $T = 340 K$ .
- **GH, MN, TU, ZG<sub>1</sub>** – «wall» – (холодные стенки (окна)):  $T = 253 K$ .

Сеточная область принята неравномерной. Её создание осуществлялось путем перемещения от краёв граней в глубь объема. Подробное исследование данной задачи на сеточную зависимость не проводилось.

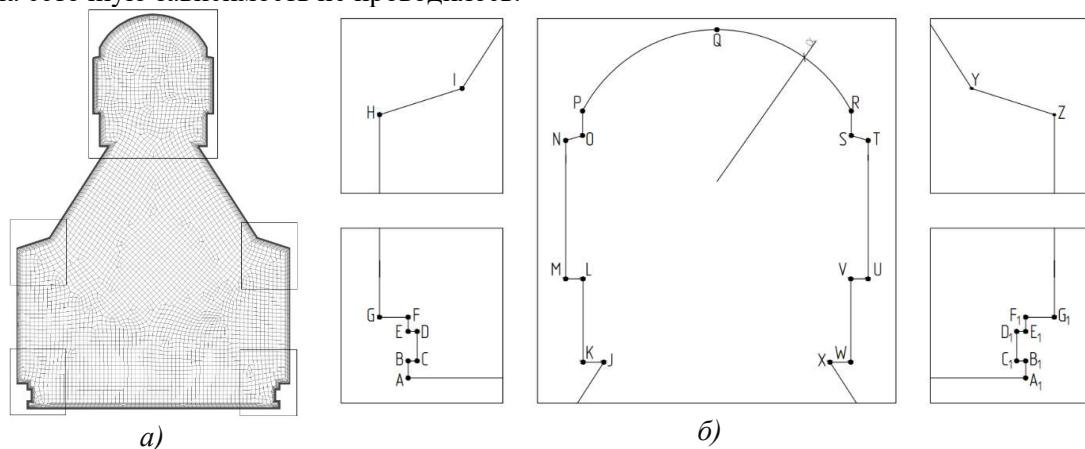


Рис. 1. Расчетная сетка (а) и схема исследуемой задачи (б). (Иллюстрация авторов)  
Fig. 1 The calculation grid (a) and the scheme of the problem under study (b).  
(Illustration by the authors)

### 3. Результаты и обсуждение

На основе разработанного фреймворка нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования микроклимата храма Александра Невского, расположенного в д. Кожевенное (Нижегородская область) [12].

На рис. 2 – 4 представлены графики невязок (рис. 2) [13, 15, 16], линий тока течения (рис. 3а) и изотермы (рис. 4а) полученные в результате расчета системы отопления с подоконными алюминиевыми радиаторами, проведенные с использованием разработанного фреймворка.

Так же на рис. 3 – 4 графики линий тока течения (рис. 3б) и изотермы (рис. 4б), полученные с использованием программного комплекса вычислительной гидро-газодинамики – ANSYS Fluent.

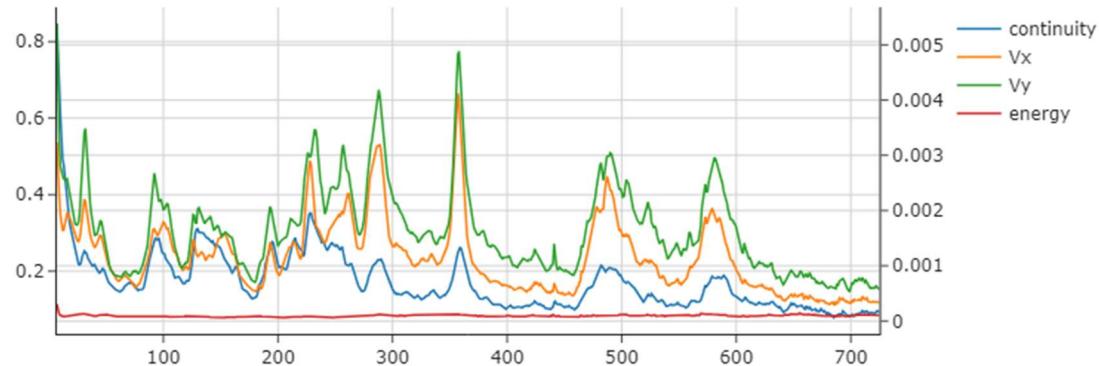


Рис.2 Иллюстрация итерационного процесса. (Иллюстрация авторов)  
Fig.2 Illustration of iterative process. (Illustration by the authors)

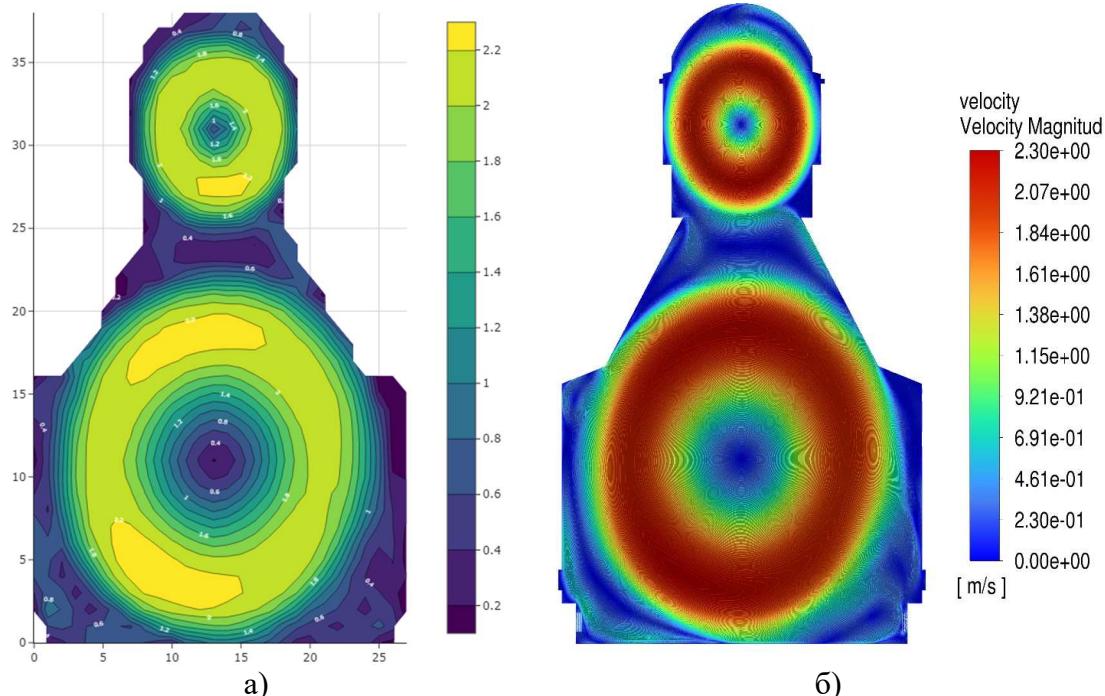


Рис. 3. Линии тока, полученные с помощью «SAFHE» (а) и в ANSYS Fluent (б).  
(Иллюстрация авторов)  
Fig. 3. Current lines obtained using SAFHE (a) and ANSYS Fluent (b).  
(Illustration by the authors)

На рис. 3 видно, как воздух, нагреваясь у подоконных алюминиевых радиаторов, поднимается вверх и встречается с холодным нисходящим потоком, охлажденным у поверхности окна в средней части храма. Далее большая часть потока движется вглубь объема, где встречается с холодным воздухом, опускающимся из барабана, а более теплая часть поднимается в данный барабан. В результате в основном объеме

формируется два основных вихря, (в средней части и в барабане) циркулирующие против часовой стрелки.

На рис. 4 показано положение изотерм, демонстрирующее распространяющие теплоты по всему объему храма.

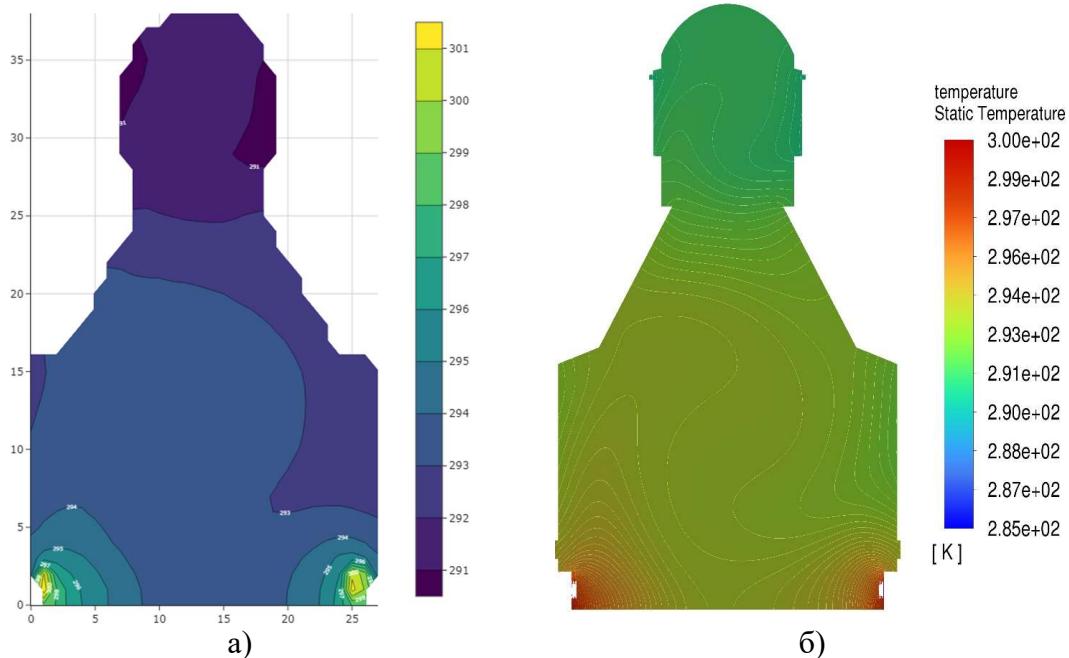


Рис. 4. Изотермы, полученные с помощью «SAFHE» (а) и в ANSYS Fluent (б).  
(Иллюстрация авторов)

Fig. 4. Isotherms obtained using SAFHE (a) and ANSYS Fluent (b).  
(Illustration by the authors)

Для сравнения результатов полученных с помощью «SAFHE» и ANSYS Fluent, были расчитаны значения профилей модуля скорости и температуры вдоль вертикальной длинной линии, проходящей через центр барабана (рис. 3б, рис. 4б) и вдоль горизонтальной линии, расположенной на высоте 1,5 м от уровня пола (рис. 5а, рис. 6а).

В качестве метрики сравнения была выбрана средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE). Для профилей модуля скорости представленных на рис. 5 и 6 MAPE составила 8,36% на горизонтальной линии (рис. 5) и 5,43% на вертикальной (рис. 6). Для температур MAPE составила 7,44% на горизонтальной линии (рис. 7) и 5,71% на вертикальной (рис. 8).

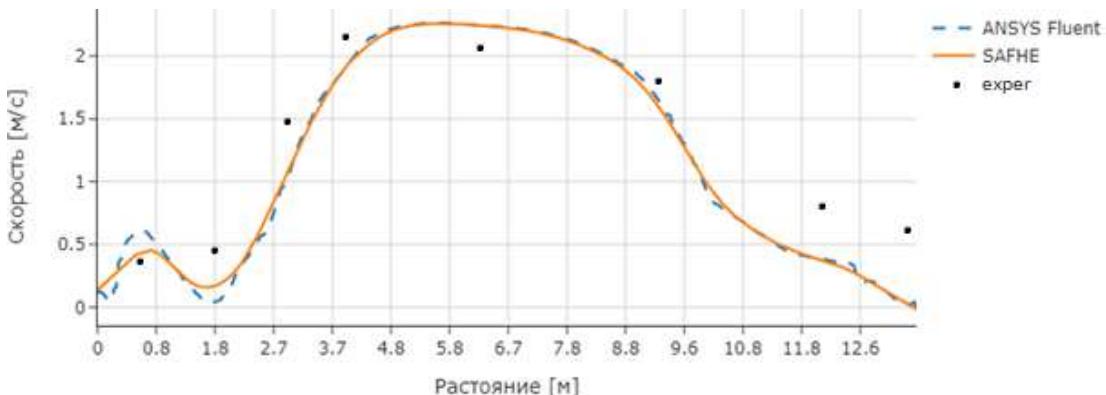


Рис. 5. Сравнение профилей модуля скорости вдоль горизонтальной линии.  
(Иллюстрация авторов)

Fig. 5. Comparison of velocity module profiles along the horizontal lines. (Illustration by the authors)

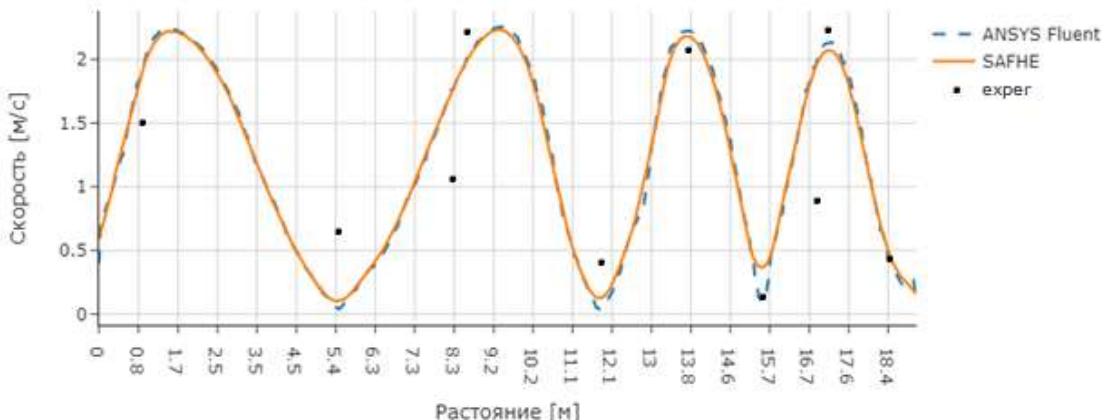


Рис. 6. Сравнение профилей модуля скорости вдоль вертикальной линии. (Иллюстрация авторов)  
Fig. 6. Comparison of velocity module profiles along the vertical lines. (Illustration by the authors)

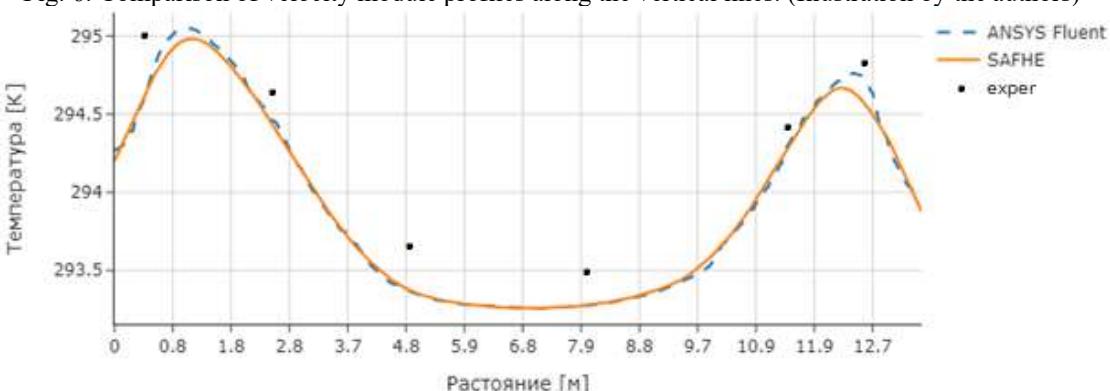


Рис. 7 Сравнение профилей температуры вдоль горизонтальной линии. (Иллюстрация авторов)  
Fig. 7. Comparison of temperature profiles along the horizontal lines. (Illustration by the authors)

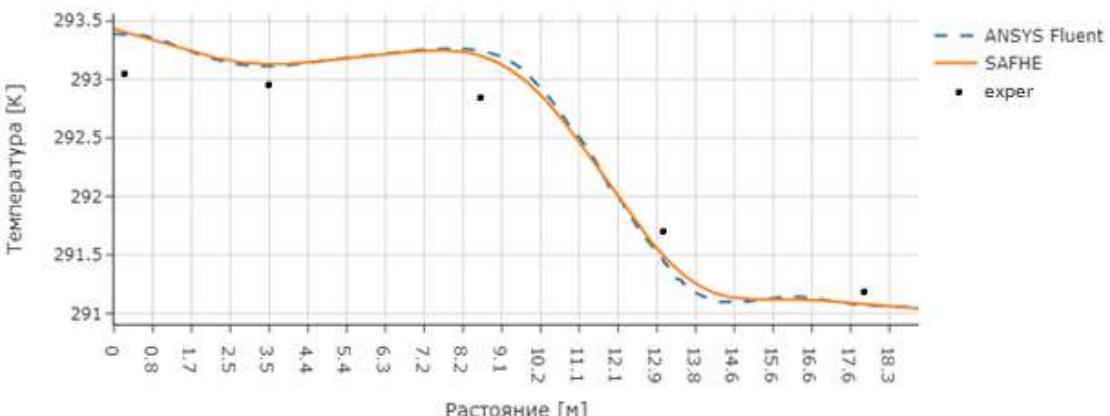


Рис. 8 Сравнение профилей температуры вдоль вертикальной линии.  
(Иллюстрация авторов)

Fig. 8. Comparison of temperature profiles along the vertical lines. (Illustration by the authors)

#### 4. Заключение

1. Невязка по уравнению неразрывности (continuity) колеблется в пределах от  $10^{-2}$  до 1 на горизонте 800 итераций, а по уравнению энергии (energy) в пределах  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$ .

Найдены средние значения скорости и температуры на вертикальном разрезе по окну ограждающих конструкций и центру барабана. При сравнении с результатами, полученными в программном комплексе ANSYS Fluent, средняя абсолютная ошибка составила 8,36% и 5,43% для модуля скорости, а для температуры 7,44% и 5,71%. При сравнении с результатами, экспериментальных измерений, средняя абсолютная ошибка составила 13,11% и 10,88% для модуля скорости и для температуры 11,52% и 10,40%

Таким образом, применение современных методов вычислительной гидро-газодинамики, позволяющих моделировать теплофизические процессы для решения

задач, связанных созданием и поддержанием требуемых параметров микроклимата внутри православных храмов, является перспективным направлением научных исследований. Использование созданных на основе данных методов программ позволит подобрать наиболее эффективный способ обеспечения микроклимата с учетом всех важных локальных параметров.

### Список литературы / References

1. Беляев К. В., Гарбарук А. В., Никулин Д. А., Стрелец М. Х. Опыт оптимизации воздухораспределения и параметров микроклимата в православном храме. // АВОК. – 2021. – №7. – С. 60–67. [Belyaev K.V., Garbaruk A.V., Nikulin D.A., Strelets M.Kh. Experience in optimizing air distribution and microclimate parameters in an Orthodox church. // АВОК. – 2021. – No. 7. – P. 60–67.]
2. Кочев А. Г., Соколов М. М., Уваров В. А. Создание температурных условий в православных храмах. // Приволжский Научный Журнал. – 2023. – №3. – С. 58–65. [Kochev A. G., Sokolov M. M., Uvarov V. A. Creation of temperature conditions in Orthodox churches. // Privolzhsky Scientific Journal. – 2023. – No. 3. – P. 58–65.]
3. Turcanu E. F., Ancas A. D., Profire M., Verdes M., Balan M. C. Thermal comfort modeling of a church heated with static heaters. // Applied Engineering Sciences. – 2019. – v. 9(1). – P. 121–124.
4. Ciocan V., Turcanu E. F., Verdes M., Luciu R. S., Balan M. C., Hudisteau1 S. V., Burlacu A. Thermal comfort assessment for different heating system using CFD-modelling inside of an orthodox church. // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – v. 586(1).
5. Turcanu E. F., Verdes M., Ciocan V., Burlacu A., Luciu R. S., Balan M. S., Sosoi G. Numerical analysis of the thermal comfort in a church building. // E3S Web of Conferences. – 2019. – v. 85.
6. Кочев А. Г., Соколов М. М., Сергиенко А. С., Москаева А. С., Кочева Е. А. Особенности создания микроклимата в православных храмах. // Известия вузов. Сер. «Строительство». – 2016. – №4 (688). – С. 74–82. [Kochev A. G., Sokolov M. M., Sergienko A. S., Moskaeva A. S., Kocheva E. A. Features of creating a microclimate in Orthodox churches. // News of universities. Ser. "Construction". – 2016. – No. 4 (688). – P. 74–82.]
7. Кочев А. Г., Соколов М. М. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов. // Приволжский Научный Журнал. – 2012. – №2 (22). – С. 75–85. [Kochev A. G., Sokolov M. M. Physico-mathematical description of natural convection in the premises of Orthodox churches. // Privolzhsky Scientific Journal. – 2012. – No. 2 (22). – P. 75–85.]
8. Кочев А. Г., Соколов М. М., Кочева Е. А., Москаева А. С. Реконструкция систем создания и поддержания микроклимата в православных храмах. // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2017. – №2. – С. 26–33. [Kochev A. G., Sokolov M. M., Kocheva E. A., Moskaeva A. S. Reconstruction of systems for creating and maintaining a microclimate in Orthodox churches. // АВОК: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermophysics. – 2017. – No. 2. – P. 26–33.]
9. Кочев А. Г., Соколов М. М. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов: научная монография. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. – 188 с.: ил. [Kochev A.G., Sokolov M.M. The influence of external aerodynamics on the microclimate of Orthodox churches: scientific monograph. – N. Novgorod: NNGASU, 2017. – 188 p.: ill.]
10. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. – 2-е изд. – М.: Мир, 1981. – 408 с. [Temam R. Navier–Stokes equations. Theory and numerical analysis. – 2<sup>nd</sup> ed. – M.: Mir, 1981. – 408 p.]
11. Куропатенко В. Ф. Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики. // Изв. вузов. Математика. – 1962. – №3, 28. [Kuropatenko V. F. Method for constructing difference schemes for

- numerical integration of gas dynamics equations. // Izv. universities Mathematics. – 1962. – No. 3, 28.]
12. Уваров В. А., Кочев А. Г. Моделирование системы воздухообмена храма Александра Невского д. Кожевенное. // XIII Всероссийский Фестиваль науки. – Н. Новгород: Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2023. – с. 233– 234. [Uvarov V. A., Kochev A. G. Modeling of the air exchange system of the Alexander Nevsky Church in the village of Kozhevennoye. // XIII All-Russian Science Festival. – N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2023. – P. 233–234.]
13. Русанов В. В. Об устойчивости метода матричной прогонки. // Вычислительная математика. – 1960. – №6. – С. 74–83. [Rusanov V.V. On the stability of the matrix sweep method. // Computational Mathematics. – 1960. – No. 6. – P. 74–83.]
14. Козлов Т. А. Моделирование воздушных течений при входе в местные отсосы-раструбы с составными полками.: дис. канд. тех. наук наук: 2.1.3. – Белгород, 2024. - 162 с. [Kozlov T. A. Modeling of air flows at the entrance to local suction sockets with composite shelves.: dis. cand. tech. sciences: 2.1.3. – Belgorod, 2024. - 162 p.]
15. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Горохова А. Ю. Численное определение параметров воздуха в помещении с теплоизбытками при вентилировании по схеме «сверху-вверх». // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения – Воронеж: Воронежский. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2014. – №4-2 (17). – С. 4–7. [Posokhin V.N., Ziganshin A.M., Gorokhova A.Yu. Numerical determination of air parameters in a room with excess heat during ventilation according to the “top-up” scheme. // Science Magazine. Engineering systems and structures – Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, 2014. – No. 4-2 (17). – P. 4–7.]
16. Зиганшин А. М. Еремина С. В., Фасыхова Г. Р. Анализ отрывного течения в симметричном тройнике круглого сечения. // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. – 2023. – №21. – С. 74–80. [Ziganshin A. M., Eremina S. V., Fasykhova G. R. Analysis of separated flow in a symmetrical tee of circular cross-section. // Quality of indoor air and environment. – 2023. – No. 21. – P. 74–80.]

#### Информация об авторах

**Уваров Валерий Александрович**, аспирант, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: Valerion052@gmail.com

**Кочев Алексей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: kochev.1961@mail.ru

**Соколов Михаил Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: araim1985@list.ru

#### Information about the authors

**Valeriy A. Uvarov**, post-graduate, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

E-mail: Valerion052@gmail.com

**Aleksey G. Kochev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: kochev.1961@mail.ru

**Mikhail M. Sokolov**. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

E-mail: araim1985@list.ru

УДК: 628.87, 004.772

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3

EDN: CQRTXM



## Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении

**И.О. Степанов<sup>1</sup>, Д.В. Крайнов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Гуп Республики Татарстан "Головная территориальная проектно-изыскательская научно-производственная фирма «Татинвестгражданпроект»",

<sup>2</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Технология информационного моделирования активно применяется на стадии проектирования и строительства, генерируя большой объем информации об объекте. На этапе эксплуатации эта информация почти не используется, хотя эксплуатационным службам она необходима для принятия эффективных решений, это и стало причиной особого внимания к данной теме. Целью исследования является разработка цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении научно-образовательного центра «Системы», расположенного на территории кампуса Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: проанализировать возможность применения технологии цифрового двойника на стадии эксплуатации здания для выбранного объекта, разработать средство измерения и метод передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель учебной аудитории.

**Результаты.** На примере учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы» разработан метод мониторинга параметров микроклимата в помещении с передачей данных в цифровую информационную модель здания в режиме реального времени. Новизна результатов заключается в усовершенствовании процесса эксплуатации зданий с целью обеспечения комфортного микроклимата в помещении. Для строительной отрасли появляется возможность оптимизировать затраты в условиях обеспечения комфортного микроклимата с использованием цифровой информационной модели здания.

**Ключевые слова:** Цифровой двойник, эксплуатация здания, технология информационного моделирования, ТИМ, интернет вещей, MQTT протокол

**Для цитирования:** Степанов И.О., Крайнов Д.В. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 26-36, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3, EDN: CQRTXM

## Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring

**I.O. Stepanov<sup>1</sup>, D.V. Kraynov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>SUE of the Republic of Tatarstan "Head Territorial Design and Survey Research and Production Firm "Tatinvestgrazdanproekt",

<sup>2</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* Information modeling technology is actively used at the design and construction stage, generating a large amount of information about the facility. At the operational stage, this information is almost not used, although operational services need it to

make effective decisions, which is the reason for special attention to this topic. The purpose of the research is to develop a digital twin for monitoring the microclimate in the premises of the scientific and educational center "Systems", located on the campus of Kazan State University of Architecture and Engineering. To achieve this goal, the following tasks are formulated: to analyze the possibility of using digital twin technology at the stage of operation of a building for a selected facility, to develop a measuring tool and a method for transmitting data on temperature and humidity of internal air to the information model of the classroom. *Results.* Using the example of a classroom at the scientific and educational center "Systems", a method for monitoring indoor microclimate parameters with data transfer to a digital information model of the building in real time has been developed. The novelty of the results lies in the improvement of the process of operating buildings in order to ensure a comfortable indoor microclimate. For the construction industry, there is an opportunity to optimize costs while ensuring a comfortable microclimate using a digital building information model.

**Keywords:** Digital twin, building operation, information modeling technology, BIM, Internet of things, MQTT protocol

**For citation:** Stepanov I.O., Kraynov D.V. Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 26-36, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3, EDN: CQRTXM

## 1. Введение

Проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция (ремонт) и стадия сноса здания являются основными этапами жизненного цикла объекта капитального строительства (ОКС). В настоящее время на каждом этапе наблюдается различная степень внедрения информационных технологий (рис. 1) [1].

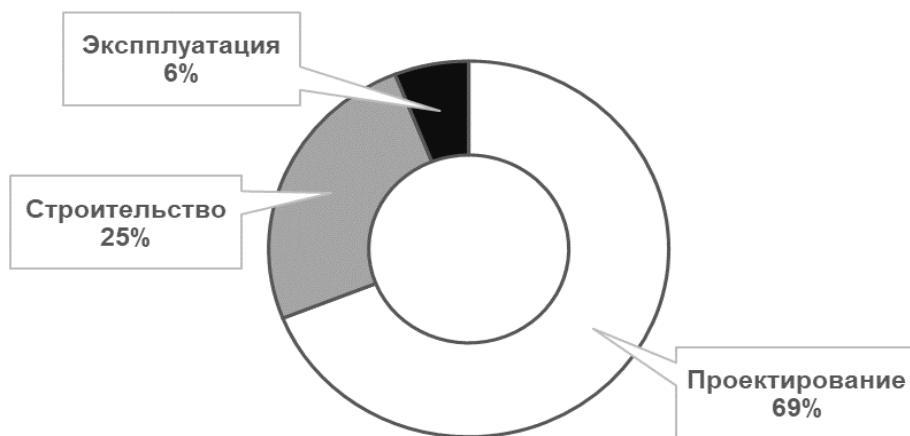


Рис.1. Применение цифровых технологий на этапах жизненного цикла здания  
(иллюстрация авторов)

Fig.1 Application of digital technologies at the stages of the building life cycle  
(illustration by the authors)

На стадии проектирования для получения проектно-сметной документации активно используются системы автоматизированного проектирования (САПР) и технология информационного моделирования (ТИМ) [2]. На этапе строительства информационные технологии применяется в меньшей степени и в основном для решения определённых задач отдела капитального строительства [3-5]. А на этапе эксплуатации информационные технологии практически не используются [6], именно это факт стал причиной особого внимания к этой теме.

На стадии эксплуатации необходимо эффективно управлять зданием, своевременно обслуживать техническое оборудование, контролировать износ конструкций, отслеживать динамические характеристики здания и быстро реагировать на чрезвычайные ситуации. Для решения этих задач возможно использование цифровой

информационной модели (ЦИМ). Однако только ЦИМ будет недостаточно по причине того, что она предоставляет лишь статические данные созданного физического объекта, что ограничивает возможности ее применения на стадии эксплуатации.

Вследствие стремительного развития технологий передачи информации в режиме реального времени с датчиков, расположенных на физическом объекте, активно стала развиваться технология цифрового двойника, в которой ЦИМ является одним из основных элементов.

На сегодняшний день исследования технологии цифровых двойников находятся на начальной стадии и имеют тесную связь с технологиями информационного моделирования и умного дома (умного города) [7-9].

Одной из задач на стадии эксплуатации является обеспечения комфорта в помещении с разумным использованием энергетических ресурсов. Для решения этой задачи авторы применили цифровой двойник для дистанционного обучения беспроводных сенсорных сетей с целью повышения энергоэффективности системы мониторинга микроклимата [10,11]. Подход по проверке и калибровке цифрового двойника на примере лучистого отопления описан в [12], что позволило снизить эксплуатационные затраты, при том же уровне комфорта. В исследовании [13] автор применяет цифровой двойник для проверки обеспечения комфорtnого микроклимата в годовом цикле эксплуатации. В работах [14,15] цифровой двойник использовали для управления системами отопления и вентиляции университетского здания, что привело к снижению финансовых затрат при сохранении комфорtnого микроклимата в помещении.

Для поддержания комфорtnого микроклимата в помещении необходимо контролировать состояние оборудования для предотвращения выхода его из строя [16]. Для решения задачи прогнозирования технического обслуживания оборудования авторы применяют технологию цифрового двойника в вентиляционных системах и для обслуживания промышленного оборудования [17-19].

Для решения этой задачи эффективного управления зданием в исследовании [20] была предложена платформа комплексного сбора исторических данных, а также получения данных в режиме реального времени, на основе которых алгоритмы искусственного интеллекта поддерживают техническое обслуживание здания, позволяя достичь оптимизации энергоэффективности. Цифровой двойник используется для создания интеллектуальной системы оптимизации и автоматизации управления электроэнергией в жилых районах города [21]. Результаты мониторинга в реальном времени на основе цифровых двойников могут преодолеть разрыв между проектными энергетическими характеристиками и фактическими характеристиками здания [22].

На основе проведенного анализа работ и исследований в области применения цифровых двойников, а также развитием проекта «Умный город», направленного на формирование эффективной системы управления городским хозяйством можно сделать вывод, что выбранная тема является актуальной. Целью данной работы является разработка цифрового двойника для мониторинга микроклимата в учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы».

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка «умного датчика» температуры и влажности;
- разработка метода передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель учебной аудитории центра «Системы».

## 2. Материалы и методы

В данной работе цифровой двойник понимается как набор параметризованных цифровых моделей, интегрированных в общий алгоритм управления объектом, с использованием внешних данных, полученных с датчиков и оборудования здания в режиме реального времени. В данной статье разработан метод мониторинга микроклимата в учебной аудитории научно-образовательного центра Системы с передачей полученных данных в информационную модель. Цифровой двойник состоит из трех базовых уровней (рис. 2).

Первый уровень осуществляет сбор информации при помощи умных датчиков, расположенных в здании.

Второй уровень хранит информационную модель здания и динамическую базу данных, в которую при помощи протоколов связи поступает информация с датчиков. Стандартные протоколы передачи данных обеспечивают двунаправленный поток обмена информацией между физическим и цифровым объектом.

Третий уровень объединяет цифровую информационную модель и базу данных при помощи Web-интерфейса. Здесь же осуществляется анализ, прогнозирование и управления зданием.

В рамках представленной работы на первом уровне для сбора информации о параметрах воздуха был разработан измеритель температуры и влажности, который состоит из измерительного датчика DHT22 и платы ESP8266 со встроенным Wi-Fi модулем, при помощи которого происходит подключение к интернету и передача данных (рис. 3).

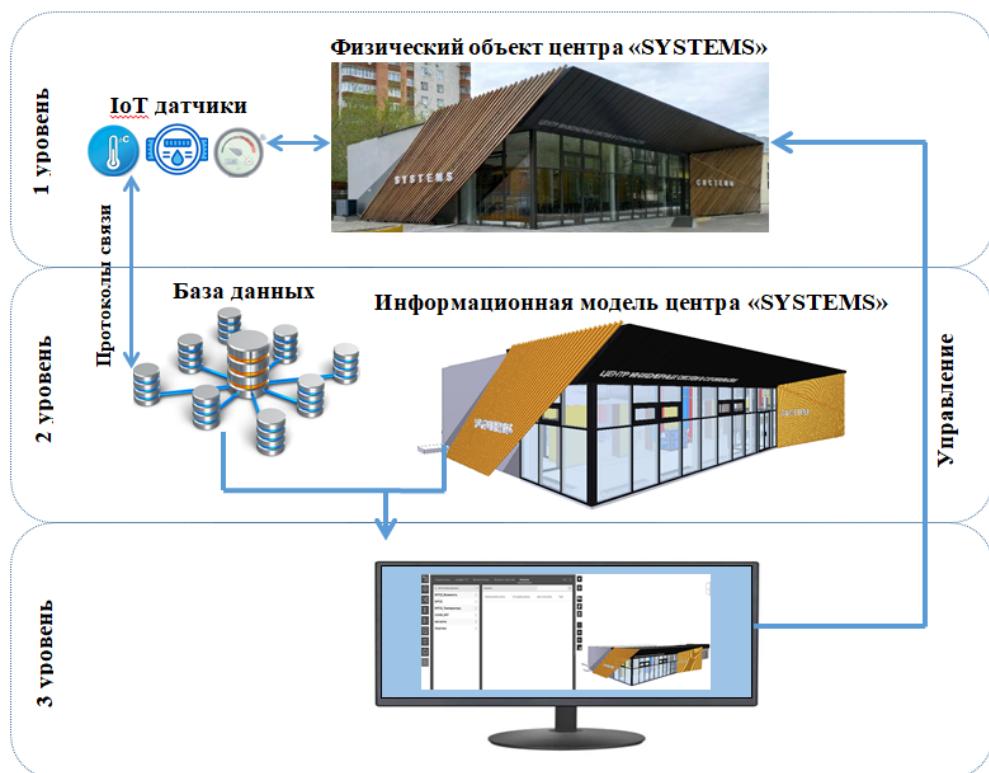


Рис.2. Концепция цифрового двойника здания на примере центра SYSTEMS  
(иллюстрация авторов)

Fig.2 The concept of a digital twin of a building using the example of the “SYSTEMS” center  
(illustration by the authors)



Рис.3. Прототип измерителя температуры и влажности (иллюстрация авторов)  
Fig.3 Prototype of a temperature and humidity meter (Illustration by the authors)

Подключение датчика DHT22 к плате ESP8266 (рис. 4) осуществляется к контакту питания VCC на 3,3В, к контакту GND (к минусу) и к контакту D5 для вывода данных с датчика.

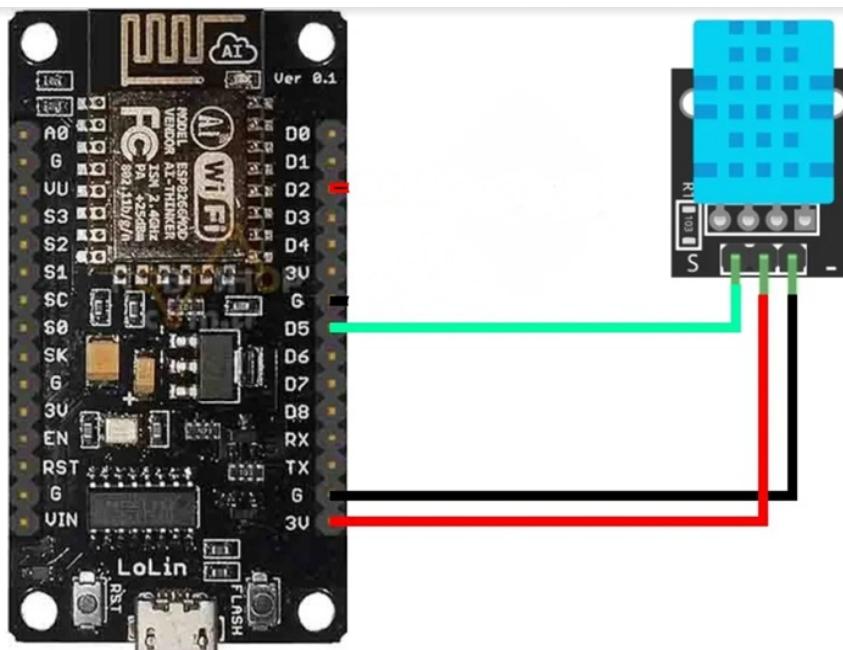


Рис.4. Схема подключения датчика к плате (иллюстрация авторов)  
Fig.4 Connection diagram of the sensor to the board (illustration by the authors)

Для защиты измерителя от механических воздействий на 3D принтере был напечатан пластиковый корпус толщиной 1,2 мм (рис. 5).



Рис.5. Измеритель температуры и влажности в корпусе (иллюстрация авторов)  
Fig.5 Temperature and humidity meter in the building (illustration by the authors)

На втором уровне использовалась информационная модель учебной аудитории центра «Системы», которая отражает геометрические характеристики объекта (рис. 6) и развернута база данных SQL на облачном сервере.

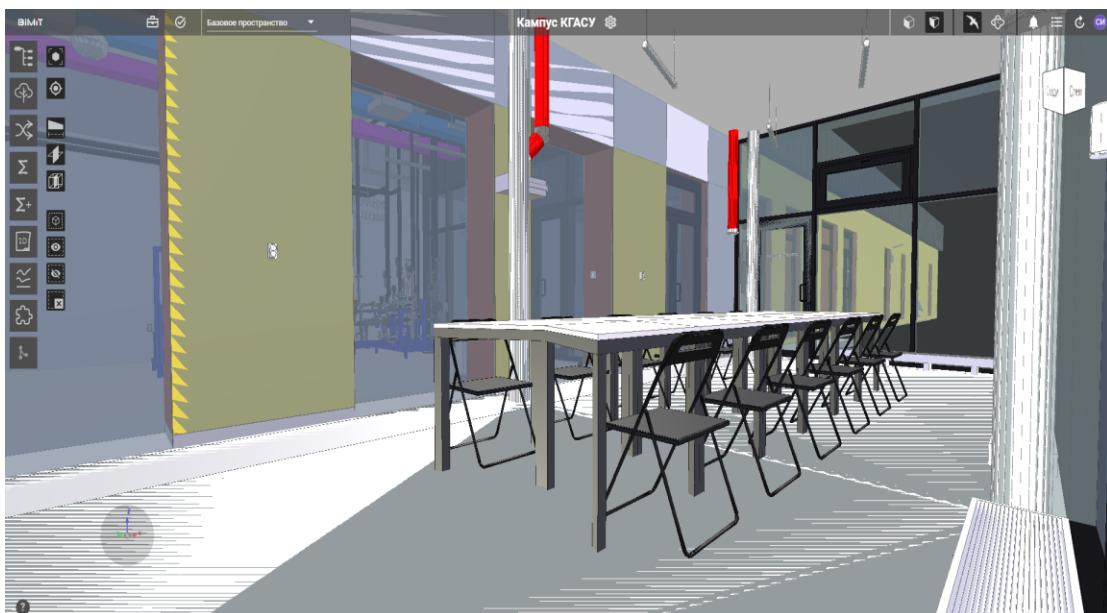


Рис.6. Информационная модель учебной аудитории научно-образовательного центра «Системы»  
(иллюстрация авторов)

Fig.6 Information model of the classroom of the scientific and educational center “Systems” (illustration by the authors)

Для передачи измерений в базу данных использовалась технология Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). MQTT - это легкий сетевой протокол обмена сообщениями, разработанный для передачи данных с минимальными затратами ресурсов и широкой полосой пропускания. MQTT широко используется в системах интернета вещей (IoT) для обмена данными между устройствами и серверами. Обмен данными между устройствами происходит только через брокера по принципу издатель-подписчик (рис. 7). Брокер - это центральный узел MQTT, который получает, обрабатывает, хранит и обеспечивает надежный обмен информацией между устройствами, благодаря контролю уровня качества передачи сообщений (Quality of Service). Принцип контроля заключается в делении сообщения на две части, первая несет в себе передаваемую информацию, а вторая степень ее значимости.

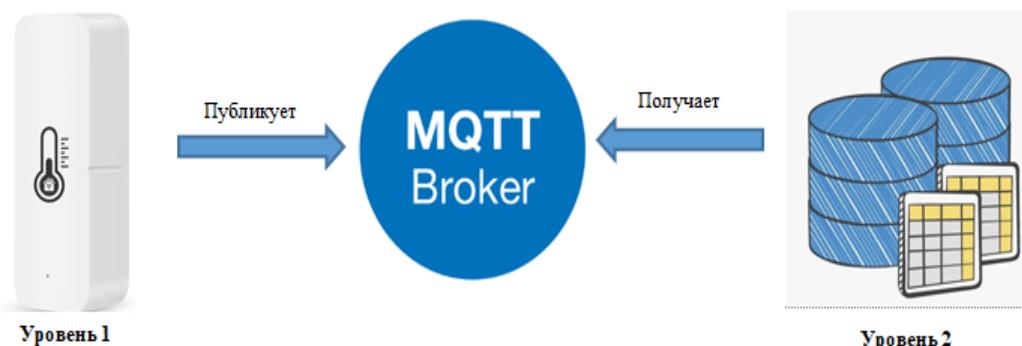


Рис.7. Схема передачи данных по MQTT протоколу (иллюстрация авторов)  
Fig.7 Scheme of data transmission via the MQTT protocol (illustration by the authors)

Третий уровень реализован в среде общих данных BIMIT, которая позволяет объединить канал передачи данных и цифровую информационную модель здания [23].

### 3. Результаты и обсуждения

При помощи Web-сервиса осуществлена интеграция архитектурной модели научно-образовательного центра «Системы» и каналов передачи температуры и влажности, полученных измерителем. Это позволило передавать данные в цифровой двойник учебной аудитории с необходимой периодичностью. В результате цифровой двойник

учебной аудитории НОЦ «Системы» при помощи MQTT протокола получает информацию о параметрах микроклимата в помещении, записывает ее в свои свойства и отображает текущие значения в режиме реального времени (рис. 8).

Важно отметить, что измеренные значения температуры и относительной влажности не только отображаются в Web-сервисе, но и сохраняются в динамической базе данных. Это дает возможность провести детальный анализ изменения параметров внутреннего воздуха в аудитории за любой период, а также позволит отслеживать динамику изменений, выявлять тенденции и прогнозировать возможные проблемы. Таким образом, система обеспечивает эффективный контроль состояния микроклимата в аудитории.

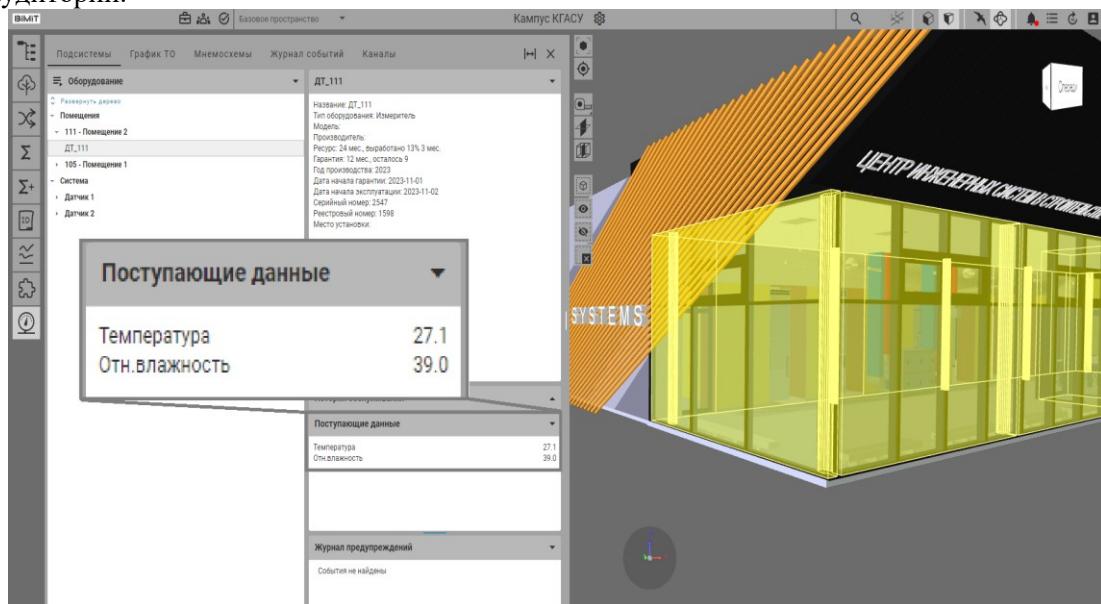


Рис.8. Отображение параметров микроклимата с привязкой к информационной модели в среде общих данных BIMIT (иллюстрация авторов)

Fig.8 Displaying microclimate parameters linked to an information model in the BIMIT common data environment (illustration by the authors)

На основе полученной информации, хранящейся в базе данных, были визуализированы изменения температуры (рис. 9) и влажности (рис. 10) внутреннего воздуха в учебной аудитории 8 февраля 2024 года. На графике видно, что температура колеблется в диапазоне 27-29 градусов, а по нормативам достаточно обеспечивать температуру от 18-20 градусов, это говорит о перерасходе энергетических ресурсов и необоснованных эксплуатационных затратах в отопительный период. Также стоит отметить скачок температуры и влажности в период 17:30 до 21:00. В это время у студентов проходят занятия, и от студентов начали поступать дополнительные теплопоступления, тем самым происходит дополнительный перегрев помещения. Данные факты показывают необходимость внедрения адаптивного отопления, что позволит снизить затраты без потери комфорта для студентов.

Также в течение года могут возникать периоды дискомфорта, связанные с колебанием наружной температуры, что ведет к ухудшению самочувствия у людей в помещении. В исследовании [24] автор при помощи компьютерного моделирования выявил, что в переходный период микроклимат в помещении ухудшается и помещение перегревается, поэтому необходимо отслеживать параметры внутреннего воздуха в течении всего года.

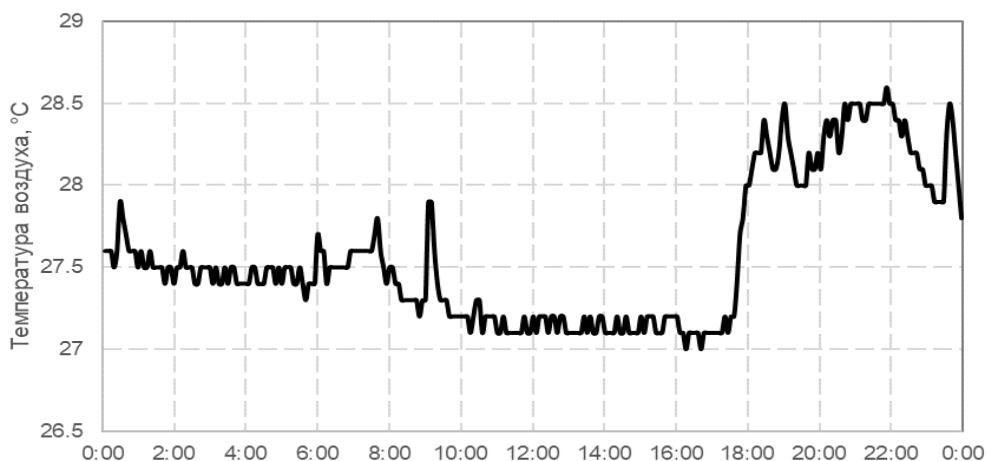


Рис.9. График изменения температуры в учебной аудитории за 08.02.2024  
(иллюстрация авторов)

Fig.9 Graph of changes in temperature in the classroom for 08.02.2024 (illustration by the authors)

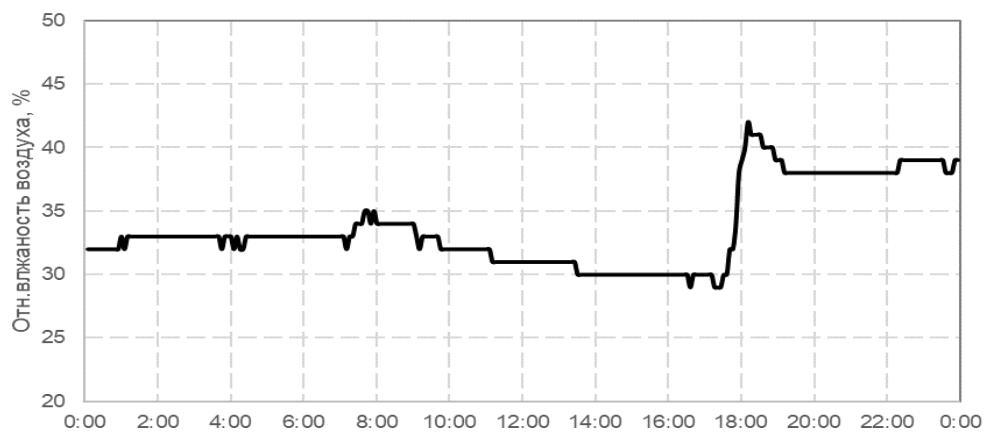


Рис.10. График изменения влажности в учебной аудитории за 08.02.2024  
(иллюстрация авторов)

Fig.10 Graph of changes in humidity in the classroom for 08.02.2024 (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

В работе был разработан метод передачи данных о температуре и влажности внутреннего воздуха в информационную модель на примере учебной аудитории центра НОЦ «Системы». Для этого был разработан датчик температуры и влажности, передающий информацию по протоколу MQTT, тем самым демонстрируя технологию цифрового двойника. Данный пример цифрового двойника позволяет отслеживать характеристики внутреннего воздуха в помещении. На основе информации полученной с датчика можно провести анализ работы системы отопления и вентиляции. Перспективой развития данной темы является разработка механизма дистанционного доступа и управления лабораторными стендами и инженерными системами при помощи технологии цифрового двойника. Применение данной технологии позволит подключить сенсоры и устройства для мониторинга состояния инженерных систем и окружающей среды в режиме реального времени для создания точной и функциональной цифровой модели зданий КГАСУ, которая поможет улучшить управление кампусом, оптимизировать затраты и повысить уровень комфорта и безопасности студентов и сотрудников.

#### Список литературы/References

1. Технологии информационного моделирования // наш.дом.рф: ежедн. интернет-изд:2024. URL:<https://наш.дом.рф/технологии-информационного-моделирования> (дата обращения 13.05.2024) [Information modeling technologies // наш.дом.рф:

- daily Internet edition: 2024. URL: <https://наш.дом.рф/технологии-информационного-моделирования> [reference date: 13.05.2024]]
2. Вайсман С.М. Разработка организационно-технологических решений в строительстве с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2016. Т. 16, № 4. С. 21–28. DOI: 10.14529/build160404.EDN: XBDEYJ [Vaisman S.M. Development of organizational and technological solutions in construction using information modeling technologies (TIM) // Bulletin of South Ural State University. The series "Construction and Architecture". 2016. Vol. 16, No. 4. P. 21-28. DOI: 10.14529/build160404.EDN: XBDEYJ]
  3. Пашин Д. А., Колосов И. Л., Якушев Н. М. Проблемы внедрения технологии информационного моделирования (ТИМ) в строительстве // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2023. Т. 19, № 4. С. 24-31. DOI: 10.22213/2618-9763-2023-4-24-31.EDN: SEANFJ [Pashin D. A., Kolosov I. L., Yakushev N. M. Problems of implementation of information modeling technology (TIM) in construction // Socio-economic management: theory and practice. 2023. Vol. 19, No. 4. P. 24-31. DOI: 10.22213/2618-9763-2023-4-24-31.EDN: SEANFJ]
  4. Дронов Д. С., Киметова Н. Р., Ткаченко В. П. Проблемы внедрения BIM-технологий в России // Синергия наук. 2017. № 10. С. 529–529. EDN: YLPAZJ [Dronov D. S., Bikmetova N. R., Tkachenko V. P. Problems of implementing BIM technologies in Russia // Synergy of Sciences. 2017. No. 10. P. 529-529. EDN: YLPAZJ]
  5. Князева Н.В., Лёвина Д.А.. "Использование BIM-сценариев в работе служб эксплуатации"//Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, 2019, стр. 99-105.DOI:10.34031/article\_5cd6df471c80bo.92422061 [Knyazeva N.V., Levina D.A.. "The use of BIM scenarios in the operation of maintenance services"//Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2019, P. 99-105.DOI:10.34031/article\_5cd6df471c80bo.92422061]
  6. Содис лаб // sodis.ru: ежедн. интернет-изд. 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru> (дата обращения 13.05.2024) [Sodis Lab // sodis.ru: daily Internet edition 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru> (reference date: 13.05.2024)]
  7. Hendrik van der Valk ; Hendrik Haße; Frederik Moller ;Boris Otto: Archetypes of Digital Twins, 2021, 1. DOI:10.1007/s12599-021-00727-7
  8. Van Nederveen, G.A.; Tolman, F.P. Modelling multiple views on buildings // Automation in Construction. 1 (3): 215-24. - 1992. - DOI:10.1016/0926-5805(92)90014-B.
  9. Min Deng, Carol C. Menassa, Vineet R. Kamat From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. // Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 2021. 26, P. 58-83, DOI: 10.36680/j.itcon.2021.005
  10. Zaballos, A.; Briones, A.; Massa, A.; Centelles, P.; Caballero,V.A Smart Campus' Digital Twin for Sustainable Comfort Monitoring. // Sustainability, 2020, DOI:10.3390-su12219196
  11. Clausen,A.;Arendt,K.;Johansen,A.;Sangogboye,F.C.;Kjærgaard,M.B.;Veje,C.T.;Jørgensen, B.N.A 1.A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings, 2021. DOI:10.1186/s42162-021-00153-9
  12. Bortolini, Rafaela, Raul Rodrigues, Hamidreza Alavi, Luisa Felix Dalla Vecchia, and Núria Forcada. "Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review" Energies 15, 2022: DOI:10.3390/en15197002
  13. Салов И.В., Щербатов И.А., and Салова Ю.А.. "Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии"// International Journal of Open Information Technologies, vol. 10, no. 3, 2022, pp. 57-62. [Salov I.V., Shcherbatov I.A., Salova Yu.A. "Application of digital twins and cyberphysical systems at thermal and electric energy generation facilities"//

- International Journal of Open Information Technologies, vol. 10, No. 3, 2022, P. 57-62.]
14. Norouzi, Pooria, Sirine Maalej, and Rodrigo Mora. "Applicability of Deep Learning Algorithms for Predicting Indoor Temperatures: Towards the Development of Digital Twin HVAC Systems" // *Buildings* 13, no. 6: 1542.2023/ DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13061542>
15. Zakharov, A., Romazanov, A., Shirokikh, A., & Zakharova, I. Intellectual Data Analysis System of Building Temperature Mode Monitoring. 2019 // International Russian Automation Conference. 2019 DOI:10.1109/rusautocon.2019.88676
16. Vering,C., Mehrfeld,P.;Nürenberg,M. Coakley,D.;Lauster,M.;Müller,D. Unlocking Potentials of Building Energy Systems' Operational Efficiency: Application of Digital Twin Design for HVAC systems, Rome, Italy, 2–4. 2019. DOI:10.26868/25222708.2019.210257
17. Жабицкий М. Г., Ожерельев С. А., and Тихомиров Г. В.. "Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта на примере исследовательского реактора НИЯУ МИФИ" // International Journal of Open Information Technologies, vol. 9, no. 8, 2021, pp. 43-51. [Zhabitsky M. G., Ozherelev S. A., Tikhomirov G. V. "The concept of an integrated digital twin of a complex engineering object on the example of a research reactor of the National Research Nuclear University MEPhI" // International Journal of Open Information Technologies, vol. 9, No. 8, 2021, P. 43-51]
18. Blume, Christine & Blume, Stefan & Thiede, Sebastian & Herrmann, Christoph. Data-Driven Digital Twins for Technical Building Services Operation in Factories: A Cooling Tower Case Study // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020 DOI: 10.3390/jmmp4040097.
19. Hosamo, Haidar & Svennevig, Paul & Svindt, Kjeld & Han, Daguang & Nielsen, Henrik. A Digital Twin Predictive Maintenance Framework of Air Handling Units based on Automatic Fault Detection and Diagnostics. // Energy and Buildings. 2022 DOI:10.1016/j.enbuild.2022.111988.
20. Ni, Zhongjun & Eriksson, Petra & Liu, Yu & Karlsson, Magnus & Gong, Shaofang. Improving energy efficiency while preserving historic buildings with digital twins and artificial intelligence. // IOP Conference Series Earth and Environmental Science.2021 DOI:10.1088/1755-1315/863/1/012041.
21. Agostinelli S., Cumo F., Guidi G., & Tomazzoli C. The Potential of Digital Twin Model Integrated With Artificial Intelligence Systems. // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 2020. DOI:10.1109/eeeic/icpseurope49358
22. Francisco, Abby & Mohammadi, Neda & Taylor, John. Smart City Digital Twin-Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. // Journal of Management in Engineering. 2020. DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000741
23. BIMIT/Цифровой двойник здания // <https://twin.bimit.ru/>: ежедн. интернет-изд: 2024. URL: <https://twin.bimit.ru/> (дата обращения 30.05.2024) [BIMIT/Digital twin of a building // <https://twin.bimit.ru/>: daily Internet edition: 2024. URL: <https://twin.bimit.ru/> (reference date: 30.05.2024)]
24. Петров А.С. Оценка длительности комфорта в помещении методом компьютерного моделирования // Жилищное строительство. – 2023. – № 8. – С. 43-52. – DOI 10.31659/0044-4472-2023-8-43-52. – EDN ABEJJF. [Petrov A.S. Assessment of the duration of comfort in a room by computer modeling // Housing construction. – 2023. – No. 8. – P. 43-52. – DOI 10.31659/0044-4472-2023-8-43-52. – EDN ABEJJF.]

### Информация об авторах

**Степанов Иван Олегович**, инженер, ГУП Республики Татарстан "Головная Территориальная Проектно-Изыскательская Научно-Производственная Фирма «Татинвестгражданпроект», г. Казань, Российская Федерация  
*E-mail: stepoooo98@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0637-9053*

**Крайнов Дмитрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
*E-mail: dmitriy.kraynov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3074-9090*

### Information about the authors

**Ivan O. Stepanov**, engineer, State Unitary Enterprise of The Republic of Tatarstan "Head Territorial Design and Survey Research and Production Firm "Tatinvestgrazhdanproekt", Kazan, Russian Federation

*E-mail: stepoooo98@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0637-9053*

**Dmitriy V. Kraynov**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

*E-mail: dmitriy.kraynov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3074-9090*



## Устойчивость элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамических воздействиях морских волн

Г.В. Тлявлина<sup>1,2</sup>, К.Н. Макаров<sup>3</sup>, Р.М. Тлявлин<sup>1</sup>, Г.А. Емельянова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (АО ЦНИИТС). Обособленное подразделение АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (МИИТ),  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Сочинский государственный университет (СГУ),  
г. Сочи, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. При проектировании транспортных сооружений, расположенных в морской береговой зоне, надежность эксплуатации обеспечивается, в том числе, эффективной работой конструкций инженерной защиты от воздействий морского волнения. В данной работе объектом исследований являются волногасящие откосы из наброски камня или фасонных массивов, расположенные в корневых частях сооружений инженерной защиты (траверсов, бун и т.п.). Исследовалась волновая картина у сооружений при воздействии волн, подходящих к откосам под углами в секторе 35°–90° градусов. Работа выполнена с использованием метода физического (гидравлического) моделирования. Целью исследований является корректировка методики расчета устойчивости элементов крепления откосных волногасящих сооружений, базирующаяся на теоретических разработках и экспериментальных данных (на данных лабораторных исследований). Задачи: выполнить физическое моделирование волновых воздействий на элементы крепления волногасящих откосов при различных углах подхода морских волн к конструкциям; предложить обоснованные научными исследованиями формулы для дополнения действующих нормативных документов в области проектирования инженерной защиты транспортных сооружений.

**Результаты.** В настоящей работе получены условия потери устойчивости элементов крепления защитных откосов, а именно, наиболее неблагоприятные углы подходы волн к конструкциям. Обоснованы полученные эффекты интерференции в зоне волновых воздействий на элементы крепления. Предложены расчетные формулы для наиболее полного учета волновых воздействий при косом подходе волн к сооружениям.

**Выводы.** Проведенные исследования, направленные на развитие и совершенствование нормативной базы в транспортном строительстве, позволяют повысить надежность и безопасность автомобильных и железных дорог, а также мостовых переходов, проектируемых и эксплуатируемых на морских побережьях. Полученные результаты, обоснованные научными исследованиями, рекомендуется отразить при актуализации нормативных документов.

**Ключевые слова:** волногасящий откос, гидродинамическое воздействие, дороги, интерференция волн, мостовой переход, транспортные сооружения, физическое моделирование, эксперимент

**Для цитирования:** Тлявлина Г.В., Макаров К.Н., Тлявлин Р.М., Емельянова Г.А. Устойчивость элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамических воздействиях морских волн // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 37–53, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.4, EDN: DZBDVS

# Stability of the fastening elements of the slopes of transport structures under the hydrodynamic effects of sea waves

G.V. Tlyavrina<sup>1,2</sup>, K.N. Makarov<sup>3</sup>, R.M. Tlyavlin<sup>1</sup>, G.A. Emelianova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Research Institute of Transport Construction

R&D Centre “Sea shores” — separate subdivision, Sochi, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Sochi State University, Sochi, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* When designing transport structures located in the offshore coastal zone, the reliability of operation is ensured, among other things, by the effective operation of engineering protection structures against the effects of sea waves. In this work, the object of research is wave-damping slopes made of rough stone or shaped massifs located in the root parts of engineering protection structures (traverses, buns, etc.). The wave pattern of structures under the influence of waves approaching the slopes at angles in the 35–90-degree sector was studied. The work was performed using the method of physical (hydraulic) modeling. The purpose of the research is to adjust the methodology for calculating the stability of the fastening elements of slope wave damping structures, based on theoretical developments and experimental data (based on laboratory research data). The tasks are to perform physical modeling of wave effects on the fastening elements of wave-damping slopes at different angles of the approach of sea waves to structures; to propose formulas based on scientific research to supplement existing regulatory documents in the field of engineering protection of transport structures.

*Results.* In this work, the conditions for the loss of stability of the fastening elements of the protective slopes are obtained, namely, the most unfavorable angles of wave approaches to structures. The obtained interference effects in the zone of wave effects on the fastening elements are substantiated. Calculation formulas are proposed for the most complete consideration of wave effects in the oblique approach of waves to structures.

*Conclusions.* The conducted research aimed at developing and improving the regulatory framework in transport construction will improve the reliability and safety of roads and railways, as well as bridge crossings designed and operated on the sea coasts. It is recommended that the results obtained, based on scientific research, be reflected in the updated version of SP 277.13258.2016.

**Keywords:** wave-damping slope, hydrodynamic effects, roads, wave interference, bridge crossing, transport structures, physical modeling, experiment

**For citation:** Tlyavrina G. V., Makarov K.N., Tlyavlin R.M., Emelianova G.A. Stability of the fastening elements of the slopes of transport structures under the hydrodynamic effects of sea waves // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 37-53, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.4, EDN: DZBDVS

## 1. Введение

В практике транспортного строительства большое значение уделяется вопросам повышения надежности и долговечности конструкций [1, 2]. С этой целью проводится большое количество исследований, анализируются причины разрушений [3-6].

Для защиты автомобильных и железных дорог, мостовых переходов и т.п. от волнового воздействия применяются волногасящие наброски из камня, обычновенных или фасонных блоков (тетраподов или гексабитов) [7-9]. Исследования, направленные на повышение эффективности защитных свойств волногасящих набросок, а также их устойчивости, имеют важное практическое значение для обеспечения надежности транспортных сооружений [10]. Изучаются вопросы наката волн на откосы, волногасящие свойства и устойчивость элементов наброски [11-13].

При проектировании конструкций защитных откосов важнейшей характеристикой является масса элементов крепления откоса, которая, в общем случае, согласно указаниям СП 277.1325800.2016 определяется по формуле (1) из СП 38.13330.2018:

$$m = \frac{3,16 k_{fr} \rho_m h^3}{\left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1\right)^2 \sqrt{1 + ctg^3 \varphi}} \sqrt{\frac{\lambda}{h}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса элемента крепления откоса, т;

$k_{fr}$  – коэффициент вида элемента;

$h$  – расчетная высота волны;

$\rho_m$  – плотность материала крепления (камня или бетона), т/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность морской воды, т/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – средняя длина волны;

$ctg \varphi$  – заложение откоса.

Однако, известны случаи разрушения откосных волногасящих сооружений в процессе эксплуатации даже при штормах, существенно слабее расчетных [14]. Данные натурных наблюдений и экспериментальных исследований показали, что при значительных глубинах перед откосными укреплениями в корневых частях и косом подходе волн к ним, имеют место значительные волновые воздействия на эти участки. Это вызывает необходимость значительного усиления конструкций по сравнению с рекомендациями нормативных документов уже на стадии эксплуатации, когда пошли значительные разрушения и причинён существенный материальный вред.

Теоретическое обоснование данного эффекта было предложено в [14]. Оно заключается в том, что при расчете массы предельного равновесия элементов крепления откоса (камня или фасонных массивов) необходимо учитывать интерференцию прямой и отраженной волн при их отражении от мола.

В частности, теоретически было установлено, что при увеличении угла подхода волны к сооружению от 0 до 56 градусов расчетная масса фасонных блоков наброски в его корневой части плавно увеличивается. Поскольку согласно формуле (1), масса предельного равновесия блока зависит от высоты волны в кубе, увеличение расчетной массы блоков может составить до трех раз. При дальнейшем увеличении угла подхода волны, расчетная масса блоков быстро уменьшается (рис. 1).

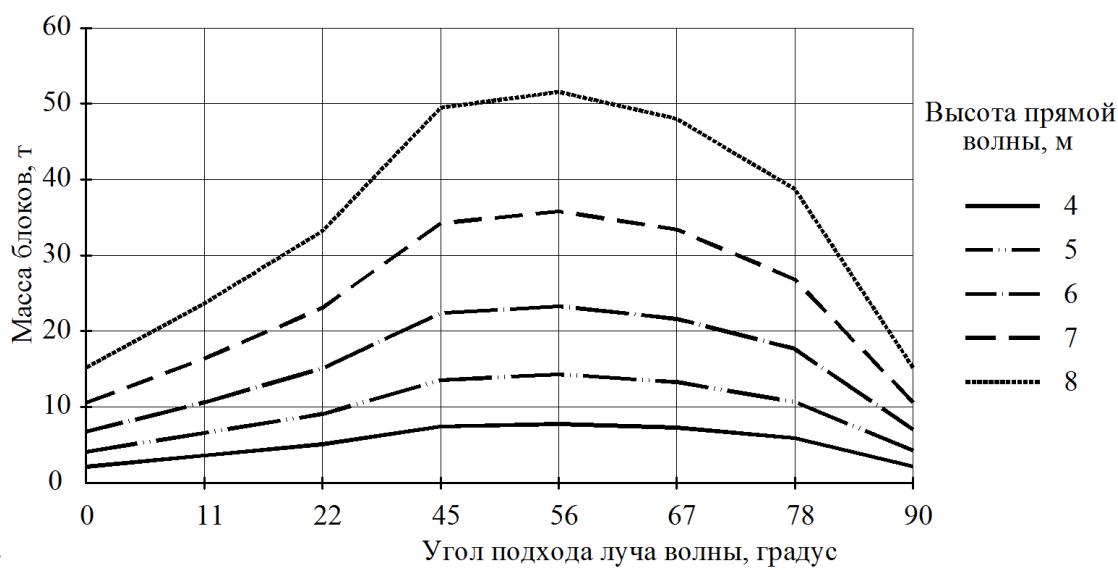


Рис. 1. Зависимость расчетной массы фасонных блоков в волногасящей наброске от высоты и угла подхода волны к сооружению при заложении откоса 1:2 (иллюстрация авторов)

Fig.1. The dependence of the calculated mass of shaped blocks in the wave-damping slope on the height and angle of the wave approach to the structure, slope 1:2 (illustration by the authors)

Была также теоретически обоснована зависимость расчетной массы фасонных блоков в защитной наброске от коэффициента отражения волн, то есть от конструкции мола (рис. 2) [14].

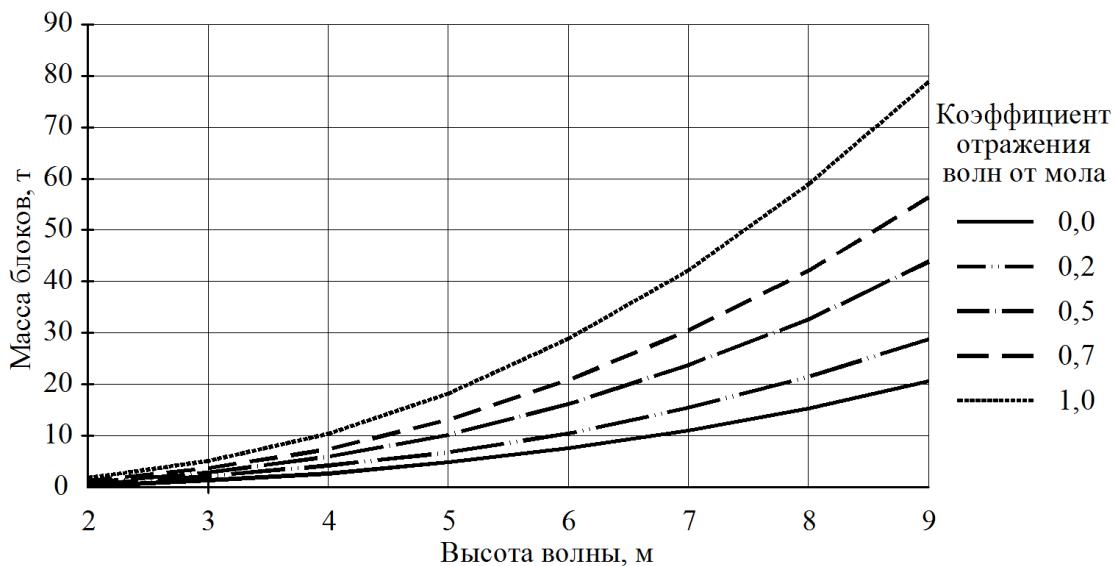


Рис. 2. Зависимость расчетной массы фасонных блоков в волногасящей наброске от высоты волны и коэффициента ее отражения от сооружения при заложении откоса 1:2 и угле подхода волны  $\alpha=45^\circ$  (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence of the calculated mass of shaped blocks in the wave-damping slope on the height of the wave and its reflection coefficient from the structure, slope 1:2 and the angle of approach of the wave  $\alpha = 45^\circ$  (illustration by the authors)

С целью разработки методики расчета устойчивости элементов крепления откосов транспортных сооружений при гидродинамическом воздействии косоподходящих волн, были проведены серии экспериментальных исследований на физических моделях в волновом бассейне. Задачи исследований:

- получение экспериментальных данных по параметрам волн у сооружений;
- получение экспериментальных данных по устойчивости элементов крепления откосов при различных углах подхода волн;
- подтверждение теоретических положений, изложенных в [14].

## 2. Материалы и методы

На физических моделях в волновом бассейне воспроизводились случаи косого подхода волн к сооружению. Исследовалась волновая картина у сооружений при воздействии волн, подходящих к откосам под углами в секторе  $35\div90$  градусов.

Моделирование выполнено в соответствии с теорией подобия [15-17], которая широко применяется для исследований волногасящих откосов как в нашей стране, так и за рубежом [18-20]. В проводимых экспериментальных исследованиях гидродинамических воздействий водной среды (волн) на защитные откосы гидroteхнических сооружений, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натурных процессов определяется равенством чисел Фруда. При исследовании волн на поверхности несжимаемой жидкости критерий Фруда может быть записан в виде:

$$v_m^2/L_m g = v_n^2/L_n g = const = Fr, \quad (2)$$

где  $v_m$  - скорость на модели,  $v_n$  - скорость в натуре,  $L_m$  - характерная длина на модели,  $L_n$  - характерная длина в натуре,  $g$  - гравитационное ускорение,  $Fr$  - число Фруда.

Ограничения по параметрам волн обусловлены необходимостью исключения заметного влияния молекулярной вязкости и капиллярных эффектов. Капиллярность (или поверхностное натяжение) можно не учитывать, если длина волн на модели  $\lambda_m$  больше 20 см [21-23]:

$$\lambda_m > 20 \text{ см.} \quad (3)$$

Чтобы обеспечить на модели и в натурных условиях равенство чисел Фруда масштаб периода волны будет равен:

$$m_t = \frac{T_m}{T_n} = \sqrt{m_h}, \quad (4)$$

где индекс «м» относится к модели, а «н» – к натурным величинам.

Масштаб массы элементов наброски принимался равным:

$$m_G = \frac{G_m}{G_n} = m_h^3. \quad (5)$$

В процессе испытаний замерялась высота волн в различных точках и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса сооружений.

### 3. Результаты и обсуждение

Вначале (серия 1) исследовалось воздействие волн на фрагмент оградительного мола без волногасящего откоса.

Параметры модели и волнения в опытах первой серии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению $\alpha$ , градусы	Высота исходных волн $h$ , см	Средний период $\bar{T}$ , с
1	90	11,5	1,0
2	80	11,5	1,0
3	70	11,5	1,0
4	60	11,5	1,0
5	55	11,5	1,0
6	50	11,5	1,0
7	45	11,5	1,0
8	35	11,5	1,0
9	90	7,5	1,0
10	55	7,5	1,0
11	50	7,5	1,0
12	45	7,5	1,0
13	40	7,5	1,0
14	35	7,5	1,0
15	30	7,5	1,0

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах первой серии представлены на рис. 3, а вид моделей во время опытов – на рис. 4.

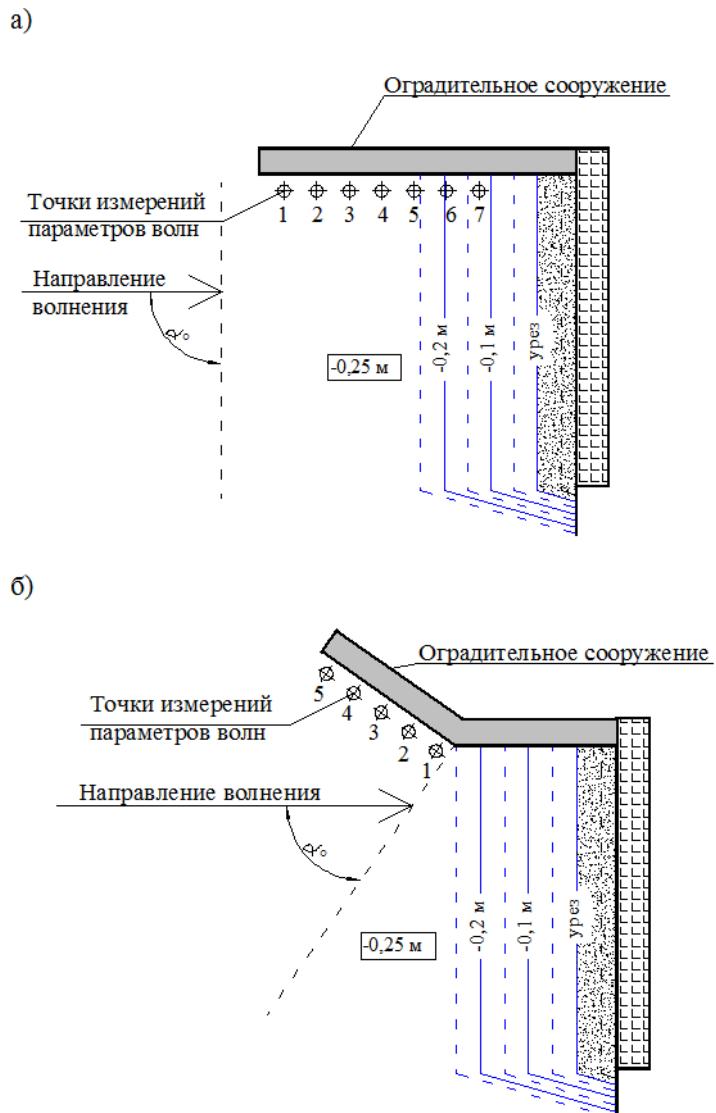


Рис. 3. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн: а – в опытах 1÷8; б – в опытах 9÷15 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. The model schemes and locations of wave height measurement points: a – in experiments 1-8; b – in experiments 9-15 (illustration by the authors)



Рис. 4. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Вид моделей во время опытов (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. View of the models during the experiments (illustration by the authors)

Результаты экспериментов первой серии представлены в таблицах 2 и 3, а также на рис. 5.

Таблица 2

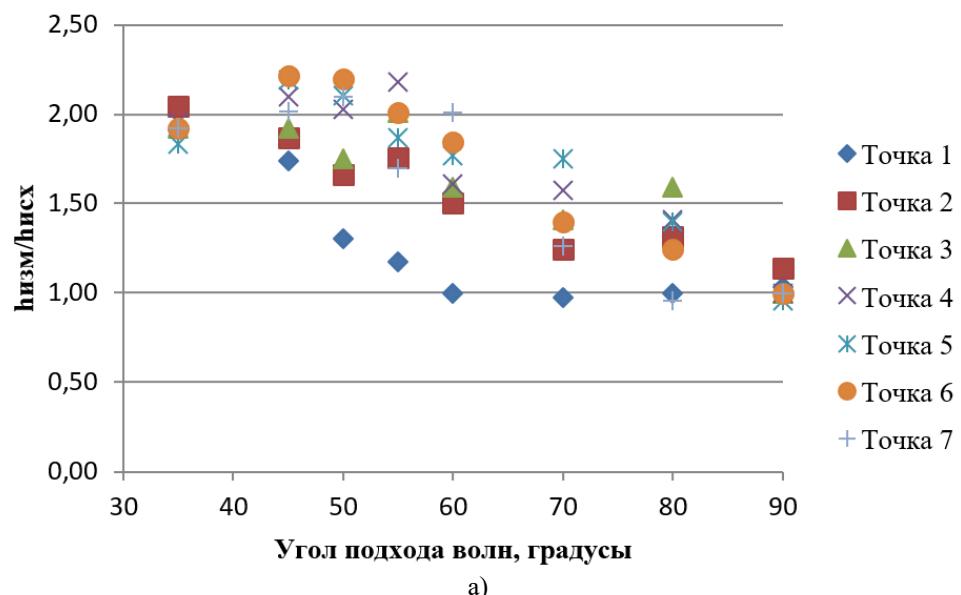
Серия 1. Опыты 1÷8. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов

№ опыта	$\alpha$ , градусы	Высота волн $h$ , см						
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6	точка 7
1	90	11,9	13,5	11,5	11,5	11,0	11,5	11,5
2	80	11,5	15,1	18,3	16,2	16,1	14,3	11,0
3	70	11,5	14,3	16,2	18,1	20,1	16,1	14,5
4	60	11,5	17,3	18,3	18,5	20,3	21,2	23,1
5	55	13,5	20,2	23,1	25,1	21,5	23,1	19,5
6	50	15,0	19,1	20,1	23,3	24,2	25,3	24,1
7	45	20,0	21,5	22,1	24,1	25,2	25,5	23,2
8	35	22,0	23,5	22,1	22,5	21,1	22,1	19,3

Таблица 3

Серия 1. Опыты 9÷15. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов

№ опыта	$\alpha$ , градусы	Высота волн $h$ , см				
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5
9	90	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
10	55	14,5	13,1	11,5	11,1	9,5
11	50	15,5	14,5	13,4	11,5	10,1
12	45	16,0	15,0	13,5	12,5	10,5
13	40	16,5	15,5	14,0	13,1	12,0
14	35	15,5	15,1	14,5	14,1	13,5
15	30	15,7	15,3	14,8	14,4	14,0



a)

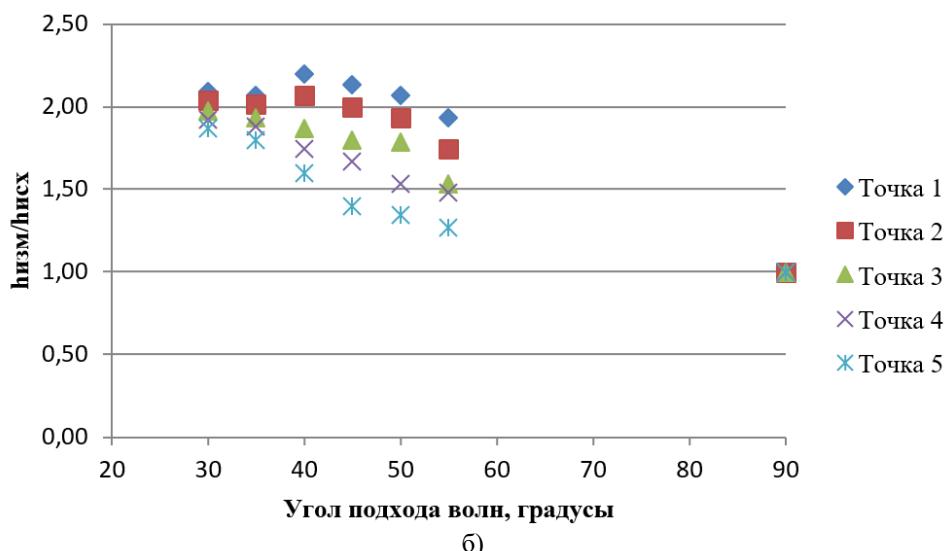


Рис. 5. Серия 1. Сооружение без волногасящего откоса. Результаты экспериментов: а – в опытах 1÷8; б – в опытах 9÷15 (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Series 1. A coastal protection structure without wave-damping slope. Experimental results: a – in experiments 1-8; b – in experiments 9-15 (illustration by the authors)

По результатам экспериментов первой серии получено, что при косом подходе волн (в особенности при угле подхода в диапазоне  $70\div35^\circ$ ) к сооружению имеет место интерференция волн, в результате чего возрастают амплитуда (высота) волн, действующих на сооружение.

Затем исследовалось действие волн на фрагмент сооружения с волногасящим откосом в корневой части (серия 2).

Масса отдельных элементов крепления волногасящего откоса, соответствующая состоянию их предельного равновесия, была рассчитана по формуле (1) для исследуемых волновых параметров.

Параметры модели и волнения в опытах представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части.  
Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению $\alpha$ , градусы	Высота исходных волн $h_{исх}$ , см	Средний период $\bar{T}$ , с	Масса камня на откосе, г
1	90	11,5	1,0	118
2	80	11,5	1,0	118
3	70	11,5	1,0	118
4	60	11,5	1,0	118
5	55	11,5	1,0	118
6	50	11,5	1,0	118
7	45	11,5	1,0	118
8	35	11,5	1,0	118

В процессе испытаний замерялась высота волн в точках 1÷7 и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса.

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах второй серии представлены на рис.6, а вид моделей во время опытов – на рис. 7.

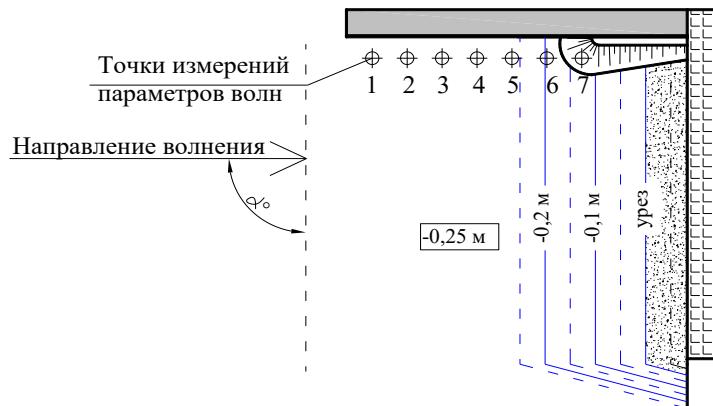


Рис. 6. Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части. Схема расположения точек измерения высот волн (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. The layout of the wave height measurement points (illustration by the authors)



Рис. 7. Серия 2. ГТС с волногасящим откосом в корневой части. Вид модели во время (слева) и по окончании (справа) опытов (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. View of the model during (left) and at the end (right) of the experiments (illustration by the authors)

Результаты испытаний представлены в таблице 5 и на графике (рис. 8).

Таблица 5  
Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части.  
Результаты экспериментов

№ опыта	$\alpha$ , градусы	Высота волн, измеренных у сооружения $h_{изм}$ , см							Устойчивость
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6	точка 7	
1	90	11,5	13,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	да
2	80	11,5	15,3	19,1	16,1	17,4	15,3	16,2	условно
3	70	11,3	15,2	17,2	19,2	20,3	17,1	15,1	нет
4	60	12,1	16,1	17,1	15,1	17,1	18,5	20,5	нет
5	55	14,5	21,3	20,3	21,3	19,1	21,1	17,5	нет
6	50	15,2	22,1	24,1	23,1	22,5	19,2	19,5	нет
7	45	16,1	19,2	19,2	17,5	21,2	20,1	24,4	нет
8	35	16,1	22,2	23,1	27,1	24,2	28,2	26,3	нет

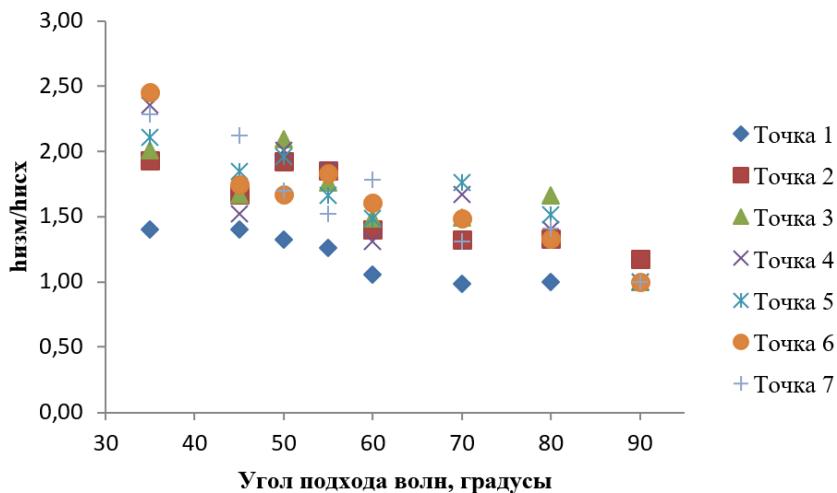


Рис. 8. Серия 2. Сооружение с волногасящим откосом в корневой части. Результаты экспериментов (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Series 2. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the root part. Experimental results (illustration by the authors)

После этого исследовалось воздействие волн на фрагмент Сооружение с волногасящим откосом в средней части (серия 3).

Параметры модели и волнения в опытах представлены в таблице 6.

Таблица 6

### Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.

Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению $\alpha$ , градусы	Высота исходных волн $h_{wzm}$ , см	Средний период $\bar{T}$ , с	Масса камня на откосе, г
1	90	7,5	1,0	25
2	55	7,5	1,0	25
3	50	7,5	1,0	25
4	45	7,5	1,0	25
5	40	7,5	1,0	25
6	35	7,5	1,0	25
7	30	7,5	1,0	25

Масса отдельных элементов крепления волногасящего откоса, соответствующая состоянию их предельного равновесия, была рассчитана по формуле (1) для исследуемых волновых параметров.

В процессе испытаний замерялась высота волн в точках 1–5 и оценивалась устойчивость элементов крепления откоса.

Схемы моделей и расположения точек измерения высот волн в опытах третьей серии представлены на рис. 9, а вид моделей во время опытов – на рис. 10. Результаты испытаний представлены в таблице 7 и на графике (рис. 11).

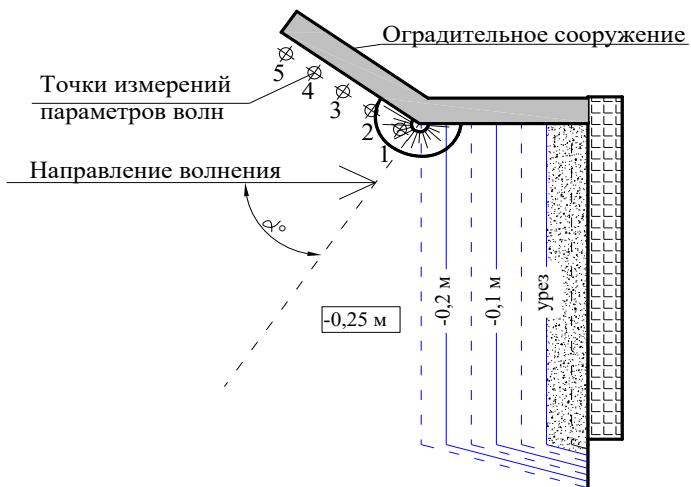


Рис. 9. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Схема расположения точек измерения высот волн (иллюстрация авторов)

Fig. 9. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. The layout of the wave height measurement points (illustration by the authors)



Рис. 10. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Вид модели во время (слева) и по окончании (справа) опытов (иллюстрация авторов)

Fig. 10. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. View of the model during (left) and at the end (right) of the experiments (illustration by the authors)

Таблица 7

Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.  
Результаты экспериментов

№ опыта	$\alpha$ , градусы	Высота волн, измеренных у сооружения $h_{изм}$ , см					Устойчивость
		точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	
1	90	8,5	6,5	7,5	7,5	7,5	да
2	55	13,5	13	12	11,2	9,5	нет
3	50	15,4	15	13,5	12	10,2	нет
4	45	15,8	15,5	14	12,8	10,6	нет
5	40	16	15,6	14,3	13,5	12,2	нет
6	35	16	15,6	14,5	14	13,4	нет
7	30	16,2	15,5	15	14,5	13,8	нет

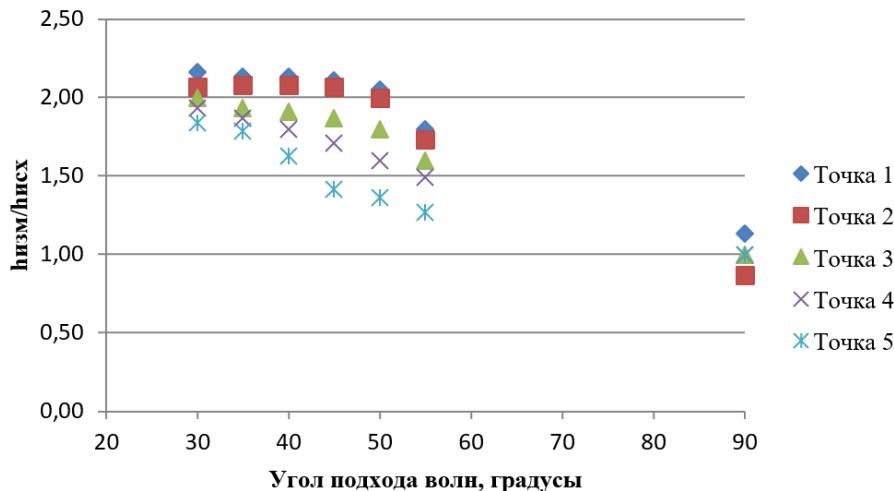


Рис. 11. Серия 3. Сооружение с волногасящим откосом в средней части. Результаты экспериментов (иллюстрация авторов)

Fig. 11. Series 3. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. Experimental results (illustration by the authors)

По результатам экспериментов подтверждено, что при косом подходе волн (в особенности при угле подхода в диапазоне  $70\text{--}35^\circ$ ) к сооружению имеет место интерференция волн, в результате чего возрастают амплитуда (высота) волн, действующих на защитную наброску. Как следствие, элементы крепления расчетной массы по формуле (1) на откосе теряют устойчивость (рис. 7 и рис. 10).

Полученные результаты согласуются с данными натурных наблюдений [7] и экспериментальных исследований [24, 25, 26] и, следовательно, могут быть использованы для корректировки нормативной методики расчета.

Из приведенных в [14] теоретических положений следует, что высота и длина интерферированной волны, определяется формулами (6) и (7):

$$h_{\text{инт}} = h_0 + k_{\text{ref}} h_0 \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{инт}} = \lambda_0 + \lambda_0 \cos \alpha \quad (7)$$

где  $h_0$  – исходная высота волны, м;  $k_{\text{ref}}$  – коэффициент отражения волн от гидротехнического сооружения (например, мола);  $\lambda_0$  – длина исходной волны, м;  $\alpha$  – угол между лучом волны и нормалью к оси мола, градусы.

Поскольку формула (1) полуэмпирическая, а на сооружение воздействует фактически прогрессивно-стоячая волна, рекомендуется в расчетах устойчивости сооружений по формуле (1) при косом подходе волн принимать  $\lambda = \lambda_0$ .

Коэффициент отражения волн от мола  $k_{\text{ref}}$  определяется в зависимости от его конструкции:

1. Берегозащитное сооружение (например, буна или мол) имеет сплошную конструкцию. Коэффициент отражения волн от него определяется по формуле А15 из СП 38.13330.2018:

$$k_{\text{ref}} = k_r k_p k_{\text{ref},i} \sqrt{\cos \alpha}, \quad (8)$$

где  $k_r$ ,  $k_p$  – коэффициенты шероховатости и проницаемости поверхности сооружения,  $k_{\text{ref},i}$  – коэффициент отражения, также принимаемый в зависимости от угла наклона отражающей поверхности к горизонту, при этом для отражающей поверхности, наклоненной к горизонту на угол более  $45$  градусов,  $k_{\text{ref},i}=1$ .

2. Берегозащитное сооружение (например, буна или мол) имеет набросную конструкцию или защиту из наброски по всей длине. Коэффициент отражения волн от него определяется по формуле ВСП 33–03–07:

$$k_{\text{ref}} = 0,038 \sqrt[3]{\frac{\lambda}{h}} \left( \frac{100\%}{\Pi} \right)^{3/2} \frac{1}{\operatorname{ctg}^2 \phi}, \quad (9)$$

где  $\Pi$  – пористость наброски (для камня  $\Pi=20-25$ , для обыкновенных бетонных массивов  $\Pi=42-44$ , для тетраподов и гексабитов  $\Pi=47-50$ ),  $\phi$  – угол наклона откоса набросной части мола к горизонту.

В расчетах устойчивости защитных набросок рекомендуется рассматривать три варианта расчета [14]:

- 1) Луч волны направлен перпендикулярно к оси мола. Наибольшие нагрузки испытывает боковая часть наброски. Расчетной является прямая волна высотой  $h_0$ .
- 2) Луч волны направлен параллельно к оси мола. Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски. Расчетной является прямая волна высотой  $h_0$ .
- 3) Луч волны направлен под углом к оси мола  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ . Наибольшие нагрузки испытывает головная часть наброски. Расчетной является интерферированная волна, определяемая по формуле (6).

Для подтверждения предложенной методики расчетов была проведена четвертая серия экспериментов, в которой схема модели была такая же, как и в опытах третьей серии (рис. 7). Отличие состояло в том, что исследования проводились с волногасящим откосом из камня массой, рассчитанной на увеличенную (в результате интерференции) волну (см. формулы (6) и (7)).

Параметры модели и волнения в опытах четвертой серии представлены в таблице 8.

Таблица 8  
Серия 4. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.  
Параметры модели и волнения

№ опыта	Угол подхода волн к сооружению $\alpha$ , градусы	Высота исходных волн $h$ , см	Средний период $\bar{T}$ , с	Масса камня на откосе, г
1	90	7,5	1,0	210
2	55	7,5	1,0	210
3	50	7,5	1,0	210
4	45	7,5	1,0	210
5	40	7,5	1,0	210
6	35	7,5	1,0	210
7	30	7,5	1,0	210

Результаты экспериментов четвертой серии представлены на рис. 12. Элементы крепления откоса оказались устойчивы к воздействию волнения.



Рис. 12. Серия 4. Сооружение с волногасящим откосом в средней части.

Вид модели во время опытов (иллюстрация авторов)

Fig. 12. Series 4. A coastal protection structure with a wave-damping slope in the middle part. View of the model during the experiments (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования устойчивости камня в защитной наброске показали, что масса предельного равновесия элементов при косом подходе волн к гидротехническому сооружению оказывается существенно большей, чем рассчитанная по указаниям СП 38.13330.2018.

Таким образом, дано экспериментальное обоснование теоретическим разработкам, которое подтверждает необходимость учета в расчетной массе фасонных блоков интерференции волн при их отражении от мола.

Разработанная методика расчета массы предельного равновесия элементов волногасящих набросок после ее проверки на гидравлической модели может быть рекомендована для корректировки СП 277.1325800.2016 *Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования*.

#### Список литературы / References

1. Гусев, А. А. К вопросу минимизации рисков при эксплуатации мостовых сооружений / А. А. Гусев, И. Ю. Майстренко // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(11). – С. 45. – EDN TFOGMR. [Gusev A.A., Maystrenko I.Y. To the issue of minimizing risks in the operation of bridge structures //Technique and Technology of Transport. – 2019. – № 11. – P. 45]
2. Зиннуров, Т. А. Предгарантийные испытания как способ повышения надежности мостовых сооружений / Т. А. Зиннуров, Б. Д. Юсупов // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 1(1). – С. 24-32. – EDN ILEHUV. [Zinnurov T.A., Yusupov B.D. Pre-warranty tests as a way to improve the reliability of bridge structures // Roads and transport infrastructure. 2023. №1 (1). P. 24-32]
3. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417. [Maistrenko I.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 1 // Internet Journal "Transport Facilities", Volume 4, No. 4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (free access). DOI: 10.15862/13TS417.]
4. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14TS417. [Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. Russian journal of transport engineering, 2017, Vol. 4, no. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/14TS417]
5. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS118. [Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Usmanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. Russian journal of transport engineering, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/08SATS118]
6. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05SATS118. [Ovchinnikov I.I., Maistrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Usmanov A.M. Accidents and destruction of bridge structures, analysis of their causes. Part 4 // Internet Journal "Transport Facilities", 2018 No. 1, <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (free access). DOI: 10.15862/05SATS118.]

7. Ashpiz, E., Urgent issues of anti-deformation measures to protect coastal railways / Ashpiz, E., Savin, A., Tlyavlin, R., & Tlyavlina, G. // Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019) / Mugla, Turkey: MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 841-852.
8. Козлов, Д. В. Комплексные технические решения при реконструкции плотин / Д. В. Козлов, Д. А. Крутов // Природообустройство. – 2018. – № 2. – С. 22-28. – DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28. [Kozlov D.V., Krutov D.A. Complex technical solutions for dams reconstruction // Environmental Engineering. – 2018. – № 2. – Р. 22-28. – DOI 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28]
9. Васильева, Е. В. Конструктивные решения волногасящих элементов для предотвращения наводнения и обеспечения безопасной и надёжной работы водных объектов / Е. В. Васильева, Е. А. Яковенко // Российская наука в современном мире : Сборник статей XXV международной научно-практической конференции, Москва, 15 октября 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2019. – С. 35-37. [Vasilyeva E.V., Yakovenko E.A. Design solutions of wave damping elements to prevent flooding and ensure safe and reliable operation of water bodies // Russian Science in the Modern World: Proceedings of XXV International Scientific-Practical conference, Research and Publishing Center "Relevance RF", Moscow, Russia October, 15, 2019]
10. Rogachko, S. I. Scientific Support of Projects of Offshore Hydraulic Structures / S. I. Rogachko, N. V. Shunko // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 56, No. 1. – Р. 1-5. – DOI 10.1007/s10749-023-01461-8. – EDN WYFJQM.
11. Парамонова, И. Е. Защита земляного полотна от размыва / И. Е. Парамонова, Н. С. Цветков, Е. С. Данильянц // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 1. – С. 459-462. [Paramonova I.E., Tsvetkov N.S., Danilyants E.S. Protection of the earth bed from scouring // Scientific, Technical and Economic Cooperation of The Asia-Pacific Countries in XXI Century. – 2023. – Vol. 1. – Р. 459-462.]
12. Кантаржи, И. Г. Экспериментальные исследования защитной наброски откосов портовых сооружений / И. Г. Кантаржи, Н. В. Шунько // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 10. – С. 10-18. [Kantarzhii I., Shunko N. Experimental studies of the protective outline of the slopes of port facilities // Power Technology and Engineering. – 2016. – № 10. – Р. 10-18.]
13. Тлявлина, Г. В. Экспериментальные исследования устойчивости волногасящих откосов для защиты мостовых опор от волнового воздействия / Г. В. Тлявлина // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 37-50. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.3.04. [Tlyavlina G.V. Experimental studies of the stability of wave-damping slopes to protect bridge supports from wave action. Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14. No. 3. P. 37-50. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.04]
14. Некоторые вопросы проектирования морских гидротехнических сооружений / А. А. Горлова, А. Н. Иваненко, Н. А. Иваненко [и др.]. – Сочи: Сочинский государственный университет, 2015. – 230 с. [Gorlova A.A., Ivanenko A.N.1, Ivanenko N.A. et al. Some questions of designing of marine hydraulic structures. – Sochi: Sochi State University, 2015. – 230 p.]
15. Шарп Д.Д. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984. – 280 с. [Sharp D.D. Hydraulic modelling. - Moscow, Mir, 1984. – 280 p.]
16. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. Users guide to physical modelling and experimentation. – London: Taylor & Francis Group, 2011. – 272 p. – DOI: 10.1201/b11335.
17. Li X., Erpicum S., Bruwier M., Mignot E., Finaud-Guyot P., Archambeau P. et al. Laboratory modelling of urban flooding: Strengths and challenges of distorted scale models // Hydrology and Earth System Sciences. 2019. Vol. 23. Issue 3. P. 1567-1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484.
18. Ranasinghe D.P.L., Kumara I.G.I.K., Engiliyage N.L., Raveenthiran K. Effectiveness of dummy water levels in physical models to optimize the toe and the crest levels //

- Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science Dec. 9th - 12th, 2020, Zhoushan, China. – P. 42-51.
19. Clavero M., Chiapponi L., Longo S., Losada M.A. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes// Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. – Springer, Cham, 2023. – P. 259-281. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_11).
20. Zuev, N. D. Physical Modeling of the Projected Marine Terminal of the Nakhodka Mineral Fertilizer Plant / N. D. Zuev, A. S. Shunko, N. V. Shunko // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 56, No. 2. – P. 186-189. – DOI 10.1007/s10749-023-01512-0. – EDN WOOMCQ.
21. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. Пер. с англ. – М.: Энергия, 1971 – 480 с. [Daily J., Harleman D. Fluid dynamics. - Moscow, Energy, 1971, 480 p.]
22. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. – М.: Изд-во МГУ, 1985 – 298с. [Kononkova G.E., Pokazeev K.V. Dynamics of sea waves. -Moscow, MGU Publishing House, 1985, 298 p.]
23. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. Пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1981 – 598 с. [Lighthill J. Waves in fluids. - Moscow, Mir, 1981, 598 p.]
24. Santamaría M., Diaz-Carrasco P., Moragues M.V., Clavero M., Losada M. Uncertainties of the actual engineering formulas for coastal protection slopes. The dimensional analysis and experimental method // Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022900>.
25. Zuev N. D., Shun'ko A. S., Shun'ko N. V. Investigation of Coefficient of Reflection of Waves Produced by a Rock-Fill Inclined Bank Protection Structure // Power Technology and Engineering. – 2019. – Vol. 53. – No 1. – P. 29-32. DOI 10.1007/s10749-019-01029-5.
26. Lishishin I.V., Tlyavlin R.M., Tlyavlina G.V. Physical model experiment of defence stability of bridge crossing slopes on Russkiy Island across The Bosphorus (the East) // Proceedings on the Third International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab 10), 28th-30th, September & October, 1st, 2010. Barcelona, Spain.

### Информация об авторах

**Тлявлина Галина Вячеславовна**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация; докторант кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: [TlyavlinaGV@Tsniiis.com](mailto:TlyavlinaGV@Tsniiis.com), ORCID: 0000-0003-4083-9014

**Макаров Константин Николаевич**, доктор технических наук, академик Академии транспорта РФ, профессор кафедры Строительства и сервиса ФГБОУ ВО «Сочинский Государственный Университет (СГУ)», г. Сочи, Российская Федерация.

E-mail: [ktk99@mail.ru](mailto:ktk99@mail.ru), ORCID: 0000-0002-6175-3618

**Тлявлин Роман Маратович**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО ЦНИИТС – руководитель ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, Российская Федерация

E-mail: [TlyavlinRM@Tsniiis.com](mailto:TlyavlinRM@Tsniiis.com), ORCID: 0000-0002-8648-0492

**Емельянова Галина Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: [ga\\_emel@mail.ru](mailto:ga_emel@mail.ru), ORCID: 0009-0006-0696-1592

### Information about the authors

**Galina V. Tlyavrina**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Modeling, Calculations and Standardization in Hydraulic Engineering, Joint Stock Company “Central research institute of Transport Construction”, R&D Centre “Sea shores”, Sochi, Russian Federation; doctoral student of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation.

*E-mail: TlyavrinaGV@Tsniiis.com, ORCID: 0000-0003-4083-9014*

**Konstantin N. Makarov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction; Sochi State University, Sochi, Russian Federation.

*E-mail: ktk99@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6175-3618*

**Roman M. Tlyavlin**, Candidate of Technical Sciences, Head of the R&D Centre “Sea shores”, Joint Stock Company “Central research institute of Transport Construction”, Sochi, Russian Federation.

*E-mail: TlyavlinRM@Tsniiis.com, ORCID: 0000-0002-8648-0492*

**Galina A. Emelianova**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Bridge and Tunnels Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation.

*E-mail: ga\_emel@mail.ru, ORCID: 0009-0006-0696-1592*

УДК: 691.168

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5

EDN: ECEAVF



## Влияние термостатирования асфальтобетонной смеси и механических нагрузок на прочность асфальтобетона

В.Ю. Бессонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Одной из основных задач при создании дорожного асфальтобетонного покрытия всегда будет его долговечность. С этой целью предлагается применять процесс предварительного термостатирования асфальтобетонной смеси. Цель работы заключается в исследовании положительного влияния этого процесса на стабилизацию прочности асфальтобетона и снижение отрицательного влияния на нее механической деструкции под воздействием нагрузки. Задачами исследования являются определение энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей, а также определение коэффициентов их чувствительности к механическим напряжениям.

**Результаты.** Описывается методика определения критерии долговечности асфальтобетонных композитов на основе термофлуктуационной теории прочности Журкова С.Н. Предложены некоторые способы их улучшения, в том числе с помощью модификации битума.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для дорожно-строительной отрасли состоит в том, что за счет применения термостатирования можно получить более долговечное асфальтобетонное покрытие.

**Ключевые слова:** адгезия, когезия, битум, прочность, асфальтобетон, долговечность, термостатирование

**Для цитирования:** Бессонова В.Ю. Влияние термостатирования асфальтобетонной смеси и механических нагрузок на прочность асфальтобетона // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 54-65, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5, EDN: ECEAVF

## The influence of temperature control of asphalt concrete mixture and mechanical loads on the strength of asphalt concrete

V.Yu. Bessonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** Problem statement. One of the main objectives when creating an asphalt concrete road surface will always be its durability. For this purpose, it is proposed to use the process of preliminary thermostating of the asphalt concrete mixture. The purpose of the work is to study the positive effect of this process on stabilizing the strength of asphalt concrete and reducing the negative impact of mechanical destruction on it under the influence of load. The objectives of the study are to determine the activation energy of the destruction of bitumen and its adhesive bonds, as well as to determine the coefficients of their sensitivity to mechanical stresses.

**Results.** A method for determining the durability criteria of asphalt concrete composites based on the thermofluctuation theory of strength by S.N. Zhurkov is described. Some ways to improve them have been proposed, including by modifying bitumen.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the road construction industry is that through the use of temperature control it is possible to obtain a more durable asphalt concrete pavement.

**Keywords:** adhesion, cohesion, bitumen, strength, asphalt concrete, durability, temperature control

**For citation:** Bessonova V.Yu. The influence of temperature control of asphalt concrete mixture and mechanical loads on the strength of asphalt concrete // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 54-65, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.5, EDN: ECEAVF

## 1. Введение

Асфальтобетон стал одним из основных материалов для создания дорожных покрытий. Он имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими материалами. К ним относятся: меньший шум от воздействия автомобильного транспорта, практически отсутствие пыли, относительно короткий промежуток времени между укладкой в дорожное покрытие и началом по нему движения и др. При появлении разрушений наиболее простая технология его ремонта, что имеет большое значение при эксплуатации дорог в сложных климатических условиях. Сюда же можно отнести возможность повторного использования материалов после реставрации асфальтобетонных покрытий. Главные разрушающие факторы асфальтобетонных покрытий — это механические нагрузки со стороны транспорта, температурные напряжения, замерзающая в порах влага, и очевидно, как считают специалисты, химические агрессивные воздействия окружающей среды.

По своему составу асфальтобетон относится к композиционным материалам. Примерно на 95 % по своей массе он состоит из минеральных материалов различной дисперсности: щебня, песка, минерального порошка. Все они объединены в один прочный композит благодаря адгезионным свойствам битума, которого в нем содержится 4-6 %.

Известно, что существует два вида разрушения структуры асфальтобетона [1-2]. Во-первых, адгезионный, при котором в процессе повышения температуры и механических нагрузок уменьшается количество химических связей активных радикалов битума с поверхностями минеральных фракций. В определенный момент они полностью исчезают [3-5]. Второй вид разрушения — когезионный. В процессе его развития происходит термомеханическая деструкция самого битума, находящегося между твердыми фракциями асфальтобетона [6-7]. При этом значительно возрастает их подвижность относительно друг друга. Возникает быстрый износ дорожного покрытия. В асфальтобетоне появляются трещины и выкрашивания.

На практике, особенно в зимнее время, имеет место разрушение и по самому щебню, когда на дорожное покрытие воздействуют шипованные покрышки автомобильных колес [8-10].

Адгезионное и когезионное разрушения развиваются одновременно, но с разной интенсивностью. Наиболее часто встречающийся вид разрушения — смешанный — частично, как отслоение битума от минеральных поверхностей, частично разрушение по битумному слою.

Многими исследованиями доказано [11-12], что физические свойства битума в его слое в зависимости от расстояния до поверхности соединяемых материалов существенно различаются. Это явление объясняется тем, что на границе молекулы битума, прежде всего входящих в него молекул асфальтенов, смол и масел под действием физических (Ван-дер-Ваальсовых сил) и химических связей создают хорошо упорядоченные структуры, прочность которых во много раз выше, чем в объеме битума [13-15].

Целью работы является исследование положительного влияния процесса предварительного термостатирования асфальтобетонной смеси на стабилизацию прочности асфальтобетона и снижение отрицательного влияния на нее механической деструкции под воздействием нагрузки.

Задачами исследования являются:

- определение энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей,
- определение коэффициентов их чувствительности к механическим напряжениям.

## 2. Материалы и методы

Исследования битума, нанесенного на полированную поверхность гранита, выполненные с помощью инфракрасной спектрометрии, показали, что частота атомов в молекулах асфальтенов непосредственно возле гранита на порядок выше, чем в остальном объеме битума, но на расстоянии не более 50 мкм это явление почти не наблюдается. Увеличение частоты колебания атомов говорит о том, что межатомные связи находятся в сжатом состоянии и следовательно их прочность, и прочность всего битума увеличивается [16-17].

Поскольку толщина слоя битума из-за шероховатостей и неправильности форм минеральных фракций, а также недостаточной степени уплотнения асфальтобетонной смеси колеблется от нескольких микрон до миллиметра и более, прочность его неодинаковая, что приводит к смешанному виду разрушения.

Прочность асфальтобетона – один из самых важных его параметров, поэтому методики ее определения достаточно подробно описаны в ГОСТах и должны строго соблюдать, как по составу образцов, так и их форме и условиям испытания. С помощью данных методик устанавливается его зависимость от таких внешних параметров как температура, скорость нагружения, влагонасыщения и т.д. Но соотношение сопротивляемости разрушению адгезионных сил и межмолекулярных связей в самом битуме не оценивались. В то же время информация по этому вопросу могла бы более эффективно искать пути увеличения не только прочности, но и долговечности асфальтобетона. Другими словами, речь идет о стабильности прочностных свойств асфальтобетона, как композиционного материала во времени под действием перечисленных выше факторов, прежде всего температуры и нагрузки. В этом отношении достаточно большие возможности предоставляет термофлуктуационная теория прочности, созданная в пятидесятые-шестидесятые годы советским академиком С.Н. Журковым. Согласно этой теории главным разрушающим фактором является подводимая тепловая энергия, а механические напряжения снижают ее уровень необходимый для разрушения в материале межатомных связей. В каноническом виде формула Журкова записывается в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность материала, (с),  $\tau_0$  - предъэкспоненциальный множитель равный  $10^{11} \cdot 10^{-13}$  с,  $u$  – энергия активации разрушения, (кДж/моль),  $\gamma$  – коэффициент чувствительности материала к механическим напряжениям, ( $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}\cdot\text{МПа}}$ ),  $\sigma$  – механические напряжения, (МПа),  $R$  – газовая постоянная, ( $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$ ),  $T$  – температура, (К).

При переменных напряжениях (нагрузках) и температуре формула записывается в виде критерия Бейли:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 \quad (2)$$

В своих работах профессор Петров В.А. – представитель научной школы С.Н. Журкова показал, что накапливаемые субмикроскопические разрушения приводят к постепенному снижению предела прочности материала или изготовленных из него конструкций. Примерно 90 % времени эксплуатации происходит медленное разупрочнение материала, которое может находиться под контролем, например, методом акустической эмиссии. В соответствии с этим в работе [16] применительно к

адгезионным соединениям была предложена и апробирована другая редакция критерия Бейли:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]_a}, \quad (3)$$

где  $[\sigma]_a$  - начальная адгезионная прочность, (МПа),  $\sigma_{\max}$  - напряжения, возникающие при максимальной нагрузке, (МПа),  $u_a$  - энергия активации разрушения адгезионных связей, (кДж/моль).

После ряда теоретических и экспериментальных исследований была выдвинута и подтверждена гипотеза, что адгезионные связи между битумом и минеральным материалом возникают в результате появления активных радикалов при термодеструкции битума, что особенно важно и его асфальтенов. Было также высказано предположение о том, что возникшие адгезионные связи сразу после образования, в свою очередь, подвергаются термодеструкции, т.е. одновременно происходят два процесса: возникновение адгезионного соединения и его разрушение. Это явление описывается выражением 4:

$$N = z \cdot \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u_{\delta} - \gamma_{\delta} \cdot \sigma}{R \cdot T}} \left( 1 - \frac{t}{2\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \cdot \sigma}{R \cdot T}} \right), \quad (4)$$

где  $N$  – количество возникших и сохраняющихся адгезионных связей на момент времени  $t$ ,  $z$  – коэффициент меньше единицы, отражающий то, что не все образовавшиеся активные радикалы образуют связи с минеральными материалами.

Проведенные экспериментальные исследования по изучению адгезионной прочности соединения гранитных образцов, склеенных битумом при температурах приготовления асфальтобетонных смесей и различной продолжительностью ее термостатирования при этой же температуре показали, что зависимость прочности от его продолжительности имеет свой экстремум. В результате из выражения (4) была получена формула для определения  $u_a$  – энергии активации разрушения адгезионных связей:

$$u_a = RT (\ln t_* - \ln \tau_0), \quad (5)$$

где  $t_*$  – продолжительность термостатирования, после которой возникала максимальная адгезионная прочность, (с).

Оставался вопрос определения величины  $u_{\delta}$  – энергии активации разрушения связей в самом битуме. Для этого предлагается использовать следующую полученную математическую зависимость:

$$u_{\delta} = \frac{\ln \left( 1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_1}} \right) - \ln \left( 1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT_2}} \right) - \ln \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad (6)$$

где  $[\sigma]_1$  и  $[\sigma]_2$  адгезионная прочность склеенных битумов образцов при температурах  $T_1$  и  $T_2$  и выдержаных при этих температурах одинаковое время  $t_*$ .

Процессы термодеструкции и образования адгезионных связей происходят в асфальтобетонной смеси во время следующих последовательных фаз: приготовление (перемешивание всех составляющих, включая битум), выдерживание в бункерах или сilosах и транспортирование к месту укладки в дорожное покрытие в режиме некоторого понижения температуры, но во всех перечисленных фаз физико-механические процессы протекают при высокой температуре.

После окончания укладки дорожного покрытия в процессе его эксплуатации окончательно сформировавшийся асфальтобетон уже подвергается механическим нагрузкам в условиях сложного напряженного состояния и температурного воздействия довольно широкого диапазона. Можно предположить, что в это время происходят процессы уже механико-термической деструкции.

С позиции термофлуктуационной теории прочности расчет долговечности асфальтобетона можно произвести с помощью одного из двух выражений.

Первое:

$$z \left( N_m - \int_0^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a - \gamma_a \sigma(t)}{RT(t)}} \right) = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]}, \quad (7)$$

где  $\gamma_a$  - коэффициент чувствительности адгезии к механическим напряжениям.

Второе выражение:

$$z \left( N_m - \int_0^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_\delta - \gamma_\delta \sigma(t)}{RT(t)}} \right) = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]} \quad (8)$$

На первом этапе рассчитываются значения величин:  $A = u_a - \gamma_a \sigma(t)$ ,  $B = u_\delta - \gamma_\delta \sigma(t)$ . Если оказывается, что  $A$  больше  $B$ , то будет иметь место когезионное разрушение. Расчет следует проводить по формуле (8). Если  $A$  меньше  $B$ , то ожидается разрушение адгезионное, применяется формула (7).

Во всех случаях встает вопрос о разработке методик определения величин коэффициентов  $\gamma_a$  и  $\gamma_\delta$ , т.к. описание методики определения энергии активации процессов разрушения адгезии  $u_a$  и битума  $u_\delta$  были разработаны и описаны ранее [17].

Для определения  $\gamma_a$  адгезионного соединения битума БНД 60/90 склеенные им при температуре 140 °C гранитные образцы нагружались постоянной сдвигающей нагрузкой, создающей в склейке напряжения в 85 % от заранее определенного предела прочности.

Из выражения (3) при постоянной температуре с учетом того, что нагрузка обеспечивается в склейке битумом напряжения 85 % от предела прочности можно записать:

$$u_a - RT(\ln \tau - 25, 7) = 0,85 \gamma_a [\sigma], \quad (9)$$

Откуда следует:

$$\gamma_a = \frac{u_a - RT(\ln \tau + 25, 7)}{0,85 [\sigma]_a} \quad (10)$$

Аналогично выражению (10) может быть записано выражение для расчета коэффициента чувствительности самого битума к напряжениям на сдвиг:

$$\gamma_{\delta} = \frac{u_{\delta} - RT(\ln \tau + 25,7)}{\sigma}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  - создаваемые касательные напряжения. Опытным путем было установлено, что их величина должна быть значительно меньше, чем при нагружении склеенных битумом образцов.

Сложность определения коэффициента чувствительности к механическим напряжениям самого битума состоит в том, что в реальных условиях его нагружение происходит, когда он находится в виде тонкого слоя в замкнутом объеме после воздействия на него температуры, при которой происходит приготовление горячей асфальтобетонной смеси. Поэтому была принята следующая методика подготовки образца битума и его разрушение на сдвиг.

Подготовка испытания битума начинается с формирования образца в виде тонкого диска. Для этого он, разогретый до температуры, соответствующей исследуемому режиму приготовления асфальтобетонной смеси, заливается в металлическое кольцо 1 (рис. 1), установленное на термоизоляционный керамический материал 4. Заранее отмеривается такое количество битума, которое после поджатия пуансона 3 до упора его бурта в кольцо 1 формировало битумный слой 2 толщиной около 2 мм. После этого вместе с керамической плитой образец помещался при той же температуре в термостат, где выдерживался при заданном условием эксперимента времени.

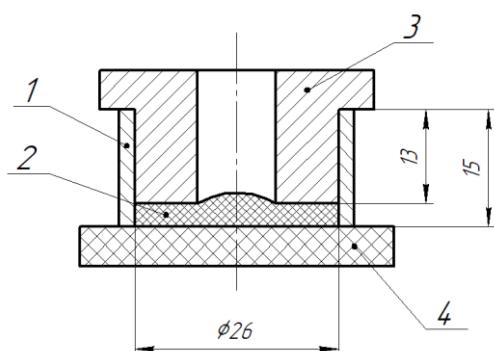


Рис.1. Формирование битумного образца-диска: 1-металлическое кольцо, 2- битум, 3-пуансон, 4-керамическая плитка (иллюстрация авторов)

Fig.1. Formation of a bitumen sample disk: 1-metal ring, 2-bitumen, 3-punch, 4-ceramic tile  
(illustration by the authors)

После термостатирования образец вместе с формой охлаждался до нормальной температуры. Затем кольцо 1 вместе с формировавшимся в нем диском битума 2 помещалось в нагружающее устройство, изображенное на рис.2.

Конструкция устройства позволяет сдвигать битум по кольцевой поверхности (в данном случае диаметр 26 мм), исключая его любое другое перемещение благодаря поджатию гайкой 3 кольца 1 и цилиндра 4. Таким образом, обеспечиваются условие чистого сдвига, аналогичные условия деформирования битумного слоя в замкнутых объемах асфальтобетона.

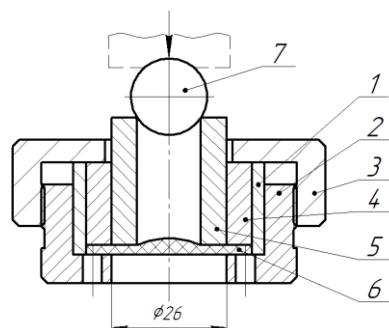


Рис. 2. Устройство для испытания образцов из битума на срез  
1-кольцо, 2-оправка, 3-поджимная гайка, 4-поджимной цилиндр, 5-пуансон, 6-битум, 7-  
металлический шарик (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Device for shear testing of bitumen samples

1-ring, 2-mandrel, 3-pressure nut, 4-pressure cylinder, 5-punch, 6-bitumen, 7-metal ball  
(illustration by the authors)

### 3. Результаты и обсуждения

На первом этапе экспериментирования по описанной выше методике была определена прочность на срез образцов битума БНД 60/90 сформированных при температуре 140 °C без термостатирования и с термостатированием (выдержкой при температуре 140 °C) в течение 72 часов. Были испытаны четыре состава битума: без модификаторов, с добавлением минерального порошка, с модификатором Амдор-10, с добавлением 4% порошка железного сурита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Результаты испытания представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1

Прочность битума на срез

Битум	Прочность, МПа	
	Без термостатирования	После термостатирования
Без модификатора	0,048	0,081
С минеральным порошком	0,091	не испытывались
с Амдор-10	0,085	не испытывались
с 4% $\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,161	0,468

На втором этапе эксперимента по испытанию битума на срез исследовалась чувствительность битума к механическим напряжениям, т.е. значение коэффициента  $\gamma_b$  без термостатирования, после термостатирования и модификатором  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Для этого образцы, установленные в оправку 2 (рис. 2), с помощью рычажного специального устройства нагружались статической сдвигающей нагрузкой. С помощью электронных часов и контактного датчика фиксировалось время  $\tau$  до разрушения испытуемого образца.

По величине действующих напряжений и продолжительности  $\tau$  с помощью формулы (11) рассчитывался коэффициент  $\gamma_b$  чувствительности битума к механическим напряжениям. Результаты в виде графиков представлены на рис. 3.

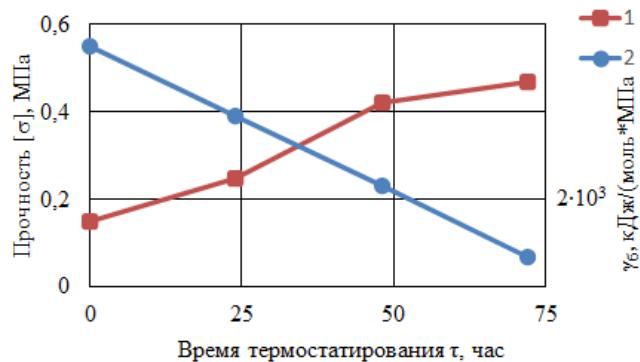


Рис. 3. Зависимость прочности битума на сдвиг  $[\sigma]$  - 1, и коэффициента его чувствительности к механическим напряжениям – 2 от термостатирования при 140 °C (иллюстрация авторов)  
Fig. 3. Dependence of bitumen shear strength  $[\sigma]$  - 1, and the coefficient of its sensitivity to mechanical stress - 2 on temperature control at 140 °C (illustration by the authors)

На третьем этапе эксперимента проводились нагружение статической нагрузкой склеенных битумом гранитных образцов с разной продолжительностью термостатирования. Поскольку прочность битумного слоя в склейке оказалась значительно выше, чем при испытаниях битумных дисков, предварительно определялась прочность при нагрузке со скоростью движения нагружающего пуансона 6 мм/с. Полученные результаты этих испытаний представлены на рис. 4.

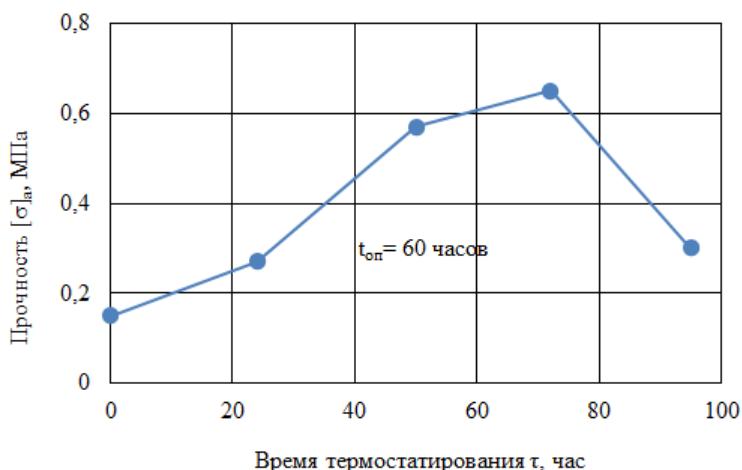


Рис. 4. Зависимость адгезионной прочности битума БНД 60/90 и гранита от времени термостатирования при температуре 140 °C (иллюстрация авторов)  
Fig. 4. Dependence of the adhesive strength of BND 60/90 bitumen and granite on temperature control time at a temperature of 140 °C (illustration by the authors)

В многочисленных исследованиях, которые проводятся на территории России [18-20] и за рубежом [21-22] доказано, что физико-механические свойства битумных вяжущих в асфальтобетоне могут быть значительно улучшены применением в них модификаторов. Сомнительно, что они могут заметно повлиять на энергию активации разрушения межатомных связей внутри битума или его адгезии, а вот на прочность самого битума, т.е. коэффициент чувствительности к механическим напряжениям, некоторые модификаторы не влияют. Это подтвердили и проведенные эксперименты, результаты которых представлены в таблице 1, где эксперименты проводились с немодифицированным и модифицированным битумом.

Следующим этапом исследования была определена чувствительность к механическим нагрузкам уже не самого битума, а его адгезии в соединении с гранитом – коэффициент  $\gamma_a$ . Рассматривался также вопрос о его зависимости от применения

модификаторов битума, в частности на примере мелкодисперсного порошка железного сурика ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и термостатирования после возникновения контакта битума и минерального материала, в данном случае гранита. Термостатирование проводилось так же, как и ранее при  $140^{\circ}\text{C}$  в течение 72 часов. Проведенные до этого исследования показали, что такой режим обеспечивает значительное увеличение адгезионной прочности. В данном случае стоял вопрос о стабильности этой прочности во времени под нагрузкой.

Величина коэффициента  $\gamma_a$  рассчитывалась по формуле (10). Ее зависимость от термостатирования и модифицирования битума железным суриком представлены графиками на рис. 5.

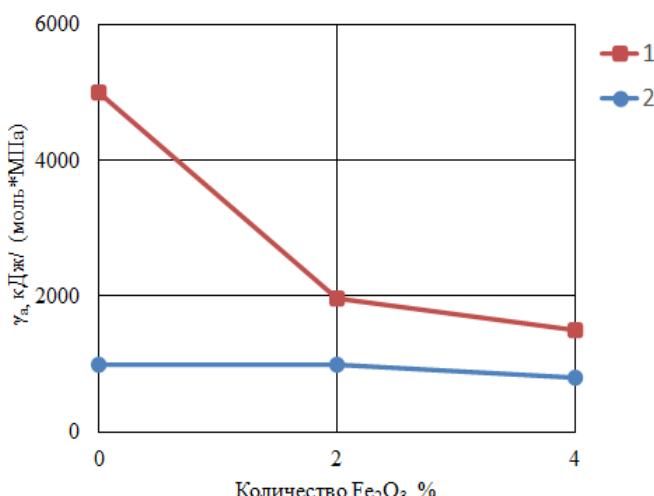


Рис. 5. Влияние  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и термостатирования на чувствительность адгезионной прочности и механической нагрузки  $\gamma_a$ : 1 – без термостатирования, 2 – после термостатирования при  $140^{\circ}\text{C}$  72 часа (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and temperature control on the sensitivity of adhesive strength and mechanical load  $\gamma_a$ : 1 – without temperature control, 2 – after temperature control at  $140^{\circ}\text{C}$  for 72 hours (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В сопротивлении разрушению асфальтобетона имеют место три реактивные составляющие: адгезия битума и минеральных фракций, сопротивление битума деформации на сдвиг и механическое зацепление минеральных фракций разной дисперсности. Важно знать долю каждого из этих составляющих из их соотношения для того, чтобы определить первостепенное направление повышения прочности и долговечность асфальтобетона.

2. Значение энергии активации разрушения адгезионных связей выше, чем самого битума. Следовательно, разрушение асфальтобетона, если не применяется его правильное термостатирование и применяемый битум не модифицирован, будет иметь когезионный характер.

3. Для разработки технологии технологических процессов приготовления асфальтобетонных смесей, их составов и оценки долговечности под воздействием нагрузок в качестве критериев желательно использовать значения энергии активации разрушения битума и его адгезионных связей, а также коэффициенты их чувствительности к механическим напряжениям. Для определения этих характеристик могут быть применены уже разработанные и описанные методики.

**Список литературы/References**

1. Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials. 2018. Vol 183. P. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169>
2. Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272>
3. Абдуллин А.И., Емельяновичева Е.А., Диляров И.Н. Оценка адгезии битума к минеральному материалу в асфальтобетоне на основе его смачивающих свойств // Вестник Казанского технологического университета. 2009. Т.4. С. 256-259. [Abdullin A.I., Emelyanycheva E.A., Diyarov I.N. Evaluation of the adhesion of bitumen to mineral material in asphalt concrete based on its wetting properties // Bulletin of the Kazan Technological University. 2009. Vol.4. P. 256-259].
4. Canestrari F., Cardone F., Graziani A., Santagata F., Bahia H. U. Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage // In Road Materials and Pavement Design. 2010. Vol. 11. P. 11-32. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690325>
5. Страхова Н.А., Цамаева П.С., Эльмурзаев А.А. Методы улучшения адгезионных свойств битумов к минеральным материалам // Вестник ГГТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. № 4(22). С. 29-35. [Strakhova N.A., Tsamaeva P.S., Elmurzaev A.A. Methods for improving the adhesion properties of bitumen to mineral materials // Bulletin GGNTU. Technical science. 2020. Vol. 16. № 4(22). P. 29-35]. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2020.25.57.004>
6. Галкин А.В., Париг Я.И. Условия определения когезионной прочности битумного вяжущего // Вестник ХНАДУ. 2017. вып. 79. С. 47-51. [Galkin A.V., Parig Ya.I. Conditions for determining the cohesive strength of bitumen binder // Bulletin of KhNADU. 2017. Iss. 79. P. 47-51].
7. Тюкилина П. М., Зиновьева Л.В., Егоров А.Г. Влияние облагораживания нефтяного сырья на когезионные и деформативные свойства дорожных битумов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2017. № 5. С. 13-18. [Tyukilina P. M., Zinov'yeva L. V., Egorov A. G. Influence of refinement of petroleum raw materials on the cohesive and deformative properties of road bitumen // Oil refining and petrochemistry. 2017. № 5. P. 13-18].
8. Ларина Т. А., Зубарев Н.Р. Модель износа асфальтобетонных покрытий при эксплуатации дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 2(88). С. 29-31 [Larina T. A., Zubarev N. R. Model of wear of asphalt concrete pavements during road operation // Science and technology in the road industry. 2019. № 2(88). P. 29-31].
9. Васильев А. Ю., Спиридонова Л.В. Изучение влияния шипованных шин на износ дорожного покрытия // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2019. № 1(19). С. 15. [Vasiliev A. Yu., Spiridonova L. V. Study of the influence of studded tires on the wear of road surfaces // Automobile. Road. Infrastructure. 2019. № 1(19). P. 15].
10. Applications of Machine Vision-Quality Control, Cancer Detection and Traffic Surveillance // Lund university (Sweden) website. URL: [http://www.maths.lu.se/fileadmin/math/personal\\_staff/hanna/phd\\_thesis.pdf](http://www.maths.lu.se/fileadmin/math/personal_staff/hanna/phd_thesis.pdf) (reference date 26.12.2023).
11. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Асфальтобетон с использованием минеральных порошков, активированных нефтяным шламом // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 5. С. 87–93. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-5-87–93> [Kopylov V.E., Burenina O.N. Asphalt concrete using mineral powders activated by oil sludge // Oil and Gas Engineering. 2022. Vol. 20, № 5. P. 87–93. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-5-87–93>].
12. Yuan, J. LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate / J. Yuan, W. J. Dong, J. J. Chen и др. // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 81. P. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.066>

13. Migle Palikaitea, Viktoras Vorobjovasa, Matas Buleviciusb, Vitalijus Andrejevasa Evaluation of different test method for bitumen adhesion properties // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 724-731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>
14. Zhang J., Apeagyei A. K., Airey G. D. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2015. Vol. 62. P. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012>
15. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 224. P. 72-112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
16. Рудской А.И., Башкарев А.Я., Бессонова В.Ю. Применение термофлуктуационной теории прочности для расчета долговечности адгезионных соединений на примере гранитно-битумных композитов// Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. № 12. С. 505-520. [Rudskoy A.I., Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu. Application of thermal fluctuation theory of strength to calculate the durability of adhesive joints using the example of granite-bitumen composites // Modern mechanical engineering. Science and education. 2023. № 12. P. 505-520]. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-555>
17. Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. № 3 (108). P. 10802. <https://doi.org/10.4123/CUBS.108.2>
18. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Mavliev L. F. Modification of bituminous binders with styrene-butadiene-styrene copolymer and sulfur // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. № 7(105). P. 10504. <https://doi.org/10.4123/CUBS.105.4>
19. Буланов П. Е., Мавлиев Л. Ф., Вдовин Е. А., Баранов В. А. Влияние эластомера на динамическую вязкость полимерно-битумных вяжущих // Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры) : Материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 30 марта 2023 года. – Москва: Государственный университет управления. 2023. С. 49-51. [Bulanov P. E., Mavliev L. F., Vdovin E. A., Baranov V. A. The influence of elastomer on the dynamic viscosity of polymer-bitumen binders // Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers): Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, March 30, 2023. – Moscow: State University of Management. 2023. P. 49-51]
20. Копылов В.Е., Буренина О.Н., Павлова Е.А. Активация минеральных порошков, как способ улучшения физико-механических характеристик асфальтовых бетонов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Том 9. № 5 <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf> (доступ свободный). [Kopylov V.E., Burenina O.N., Pavlova E.A. Activation of mineral powders as a way to improve the physical and mechanical characteristics of asphalt concrete // Internet journal “SCIENCE”. 2017. Vol. 9. № 5 <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf> (free access)].
21. Porto M. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances / P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, C. Rossi // Appl. Sci. 2019. № 9. P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>
22. Gawdzik Barbara, Tadeusz Matynia and Krzysztof Blazejowski. The use of De-vulcanized recycled rubber in the modification of road bitumen // Material 2020. 13(21), P.1-21. <https://doi.org/10.3390/ma13214864>

### Информация об авторах

**Бессонова Виктория Юрьевна**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
*Email: bessonova\_vyu@spbstu.ru , ORCID: 0000-0003-1942-5562*

### Information about the authors

**Victoria Yu. Bessonova**, post-graduate student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation  
*Email: bessonova\_vyu@spbstu.ru, ORCID: 0000-0003-1942-5562*

УДК: 625.848

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.6

EDN: GAADEC



## Требования к герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий автомобильных дорог

**В.А. Максимов<sup>1</sup>, В.В. Ушаков<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Качественная и своевременная герметизация деформационных швов цементобетонных покрытий является неотъемлемой частью в поддержании высокого срока службы автомобильных дорог. В связи с расширением видов и качества герметизирующих материалов необходима разработка требований к герметизации деформационных швов. Цель работы заключается в определении факторов, от которых зависит выбор герметизирующих материалов, что в свою очередь, оказывает влияние на работоспособность деформационных швов цементобетонных покрытий. Задачами исследования являются: анализ основных герметизирующих материалов для деформационных швов цементобетонных покрытий, сравнение их основных характеристик, а также выявление факторов, оказывающих влияние на срок службы деформационных швов цементобетонных покрытий.

**Результаты.** Описаны основные климатические и эксплуатационные воздействия на деформационные швы, оказывающие влияние на срок службы цементобетонных покрытий. Рассмотрены основные виды и причины разрушения герметизирующих материалов в деформационных швах. Даны рекомендации в части правильного назначения герметизирующих материалов, с учетом природно-климатических условий эксплуатации цементобетонных покрытий.

**Выводы.** Результаты проведенного исследования позволяют установить преимущества и недостатки различных видов герметизирующих материалов и дать рекомендации по их выбору.

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, цементобетонные покрытия, деформационные швы, герметизирующие материалы, герметизация

**Для цитирования:** Максимов В.А., Ушаков В.В. Требования к герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий автомобильных дорог // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 66-76, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.6, EDN: GAADEC

## Requirements for sealing expansion joints of cement concrete pavements of highways

**V.A. Maksimov<sup>1</sup>, V.V. Ushakov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Moscow Automobile and Highway State Technical University,  
Moscow, Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* High-quality and timely sealing of expansion joints of cement concrete pavements is an integral part in maintaining a high service life of highways. In connection with the extension of the types and quality of sealing materials, it is necessary to develop requirements for sealing expansion joints. The purpose of the work is to determine the factors on which the choice of sealing materials depends, which in turn affects the performance of expansion joints of cement concrete pavements. The objectives of the study are: analysis of

the main sealing materials for expansion joints of cement concrete pavements, comparison of their main characteristics, as well as identification of factors that influence the service life of expansion joints of cement concrete pavements.

*Results.* The main climatic and operational influences on expansion joints that affect the service life of cement concrete pavements are described. The main types and causes of destruction of sealing materials in expansion joints are considered. Recommendations are given regarding the correct purpose of sealing materials, taking into account the natural and climatic conditions of operation of cement concrete pavements.

*Conclusions.* The results of the study make it possible to establish the advantages and disadvantages of various types of sealing materials and provide recommendations for their selection.

**Keywords:** highways, cement concrete pavements, expansion joints, sealing materials, sealing

**For citation:** Maksimov V.A., Ushakov V.V. Requirements for sealing expansion joints of cement concrete pavements of highways // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 66-76, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.6, EDN: GAADEC

## 1. Введение

Цементобетонные покрытия автомобильных дорог в период всего срока эксплуатации подвержены воздействию транспортных нагрузок и различных природно-климатических факторов (температурным воздействиям от изменения температуры и периодическим циклам замораживания-оттаивания) [1-3]. Среди данных факторов особое место занимают климатические условия (суточные и годовые колебания температуры). Температурный режим во многом зависит от величины и скорости изменения температуры воздуха, а также от солнечной радиации [4-6].

Снижение срока службы цементобетонных покрытий автомобильных дорог во многом связано с разрушением деформационных швов. Современное строительство цементобетонных покрытий предполагает использование различных типов герметизирующих материалов в деформационных швах [7-9]. Из всего многообразия герметиков, в дорожном строительстве лидирующие места занимают полимерно-битумные и полисульфидные герметики [10-12]. Однако в настоящее время отсутствует систематизация требований в Российской Федерации к герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий. Цель данной работы состоит в определении тех факторов, от которых зависит выбор герметизирующих материалов, что оказывает влияние на работоспособность деформационных швов цементобетонных покрытий.

Задачами исследования являются:

- анализ основных герметизирующих материалов для деформационных швов цементобетонных покрытий, сравнение их основных характеристик;
- выявление факторов, оказывающих влияние на срок службы деформационных швов цементобетонных покрытий автомобильных дорог.

## 2. Материалы и методы

Для анализа были изучены работы отечественных и зарубежных авторов, в том числе, диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (О.А. Сидоркина, В.В. Ушакова, В.В. Лазукина, В.А. Башкатовой, Л.Н. Комчихиной, А.С. Семенова и др.). В данных работах авторами рассмотрены вопросы прогнозирования циклической долговечности герметизирующего материала в деформационных швах жестких аэродромных покрытий [13-15], повышения уровня эксплуатационно-технического состояния аэродромных покрытий за счет разработки и применения эффективных герметизирующих материалов, а также исследования температурных перемещений [16] и разработки метода расчета оптимальных размеров плит цементобетонных покрытий.

Также детально изучены нормативные документы и стандарты организаций на полимерно-битумные и полисульфидные герметики. Исходя из данных стандартов, полимерно-битумные герметики для герметизации деформационных швов

подразделяются в зависимости от температурных пределов их эксплуатации. Полисульфидные герметики же не классифицируются исходя из температурных пределов их эксплуатации [17-19]. Также, на основе нормативной документации, комплексно обобщены основные физико-механические показатели герметизирующих материалов [20-22]. Рассмотрена и проанализирована работоспособность герметизирующих материалов в деформационных швах цементобетонных покрытий, а также влияние температурных перепадов на деформационные швы, в целом [23-25].

### 3. Результаты и обсуждение

На сегодняшний день, наибольшее распространение получили дорожные полимерно-битумные герметики. Среди отечественных герметиков, наибольшее распространение, в части герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий, получили герметики «Брит» и «Новомаст», их основные характеристики приведены в табл. 1. Среди импортных герметиков, значительное применение в Российской Федерации получили «Crafco» (США) и «Biguma» (Германия).

Таблица 1

Характеристики полимерно-битумных герметизирующих материалов для деформационных швов цементобетонных покрытий

Герметизирующий материал	Относительное удлинение при разрыве при температуре -20 °C, %, не менее	Гибкость, °C, не выше	Температура липкости, °C, не ниже	Дорожно-климатические зоны
«Брит» БП-Г25	75	-25	+50	III – V
«Брит» БП-Г35	150	-35	+50	II – IV
«Брит» БП-Г45	200	-45	+80	IV – V
«Брит» БП-Г50	200	-50	+50	I – II
«Брит» БП-Г55 Nord	300	-55	+50	I – II
«Брит» Арктик-3	150	-45	+70	II – IV
«Новомаст» БП-Г25Т	75	-25	+65	III – V
«Новомаст» БП-Г35Ш	150	-35	+75	II – III
«Новомаст» БП-Г50Ш	200	-50	+75	I – II

Однако, в последние годы, наметилась тенденция к активному использованию полисульфидных (тиоколовых) герметиков. Отличительными свойствами полисульфидных герметиков является, во-первых, сохранение эластичности и прочности в широком диапазоне температур; во-вторых, высокая стойкость к воздействию УФ-облучения и атмосферным воздействиям; в-третьих, отверждение герметика в заранее заданное время независимо от внешних условий и сохранение адгезии в присутствии воды [26-28].

Основными производителями полисульфидных герметиков в Российской Федерации для деформационных швов являются производственные компании САЗИ (ООО «ПК «САЗИ») и ООО «Химтех-Р». Основные характеристики полисульфидных герметизирующих материалов для деформационных швов цементобетонных покрытий приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Характеристики полисульфидных герметизирующих материалов для деформационных швов цементобетонных покрытий

Герметизирующий материал	Относительное удлинение при разрыве при температуре -20 °C, %, не менее	Относительное удлинение при разрыве, на образцах швов, %, не менее	Гибкость, °C, не выше	Температура липкости, °C, не ниже	Диапазон температур эксплуатации
«Сазиласт 501»	150	250	-60	+110	от -60 до +90
«Сазиласт 502»	300	350	-60	+110	от -60 до +90
«Сазиласт 503»	250	300	-60	+110	от -60 до +90
«Лепта Ъ» марка 1	380	-	-60	+125	от -60 до +120

Согласно современной классификации, полимерно-битумные герметики для герметизации деформационных швов в цементобетонных покрытиях автомобильных дорог, в зависимости от температурных пределов их эксплуатации, подразделяются на типы: Ш<sub>1</sub> (от -40 °C до +60 °C), Ш<sub>2</sub> (от -40 °C до +80 °C), Ш<sub>3</sub> (от -35 °C до +90 °C). Их физико-механические характеристики определяются в зависимости от тех же температурных пределов эксплуатации. В табл. 3 приведены физико-механические показатели полимерно-битумных герметиков.

Таблица 3  
Основные физико-механические показатели полимерно-битумных герметиков в зависимости от температур их эксплуатации

Показатель	Норма для типа		
	Ш <sub>1</sub>	Ш <sub>2</sub>	Ш <sub>3</sub>
1. Температура размягчения по Кольцу и Шару, °C, не ниже	80	90	100
2. Адгезия с основанием методом отрыва, МПа, не менее		1,0	
3. Относительное удлинение на растяжении при -20 °C, %, не менее	150	80	-
4. Эластичность при 0 °C, %, не менее		100	
5. Текучесть, мм, при температуре:			
60 °C	0 – 3	-	-
70 °C	-	-	0 – 1
80 °C	-	0 – 3	-
6. Водопоглощение, %, не более		0,2	

Полисульфидные же герметики, в отличии от битумных, не классифицируются исходя из температурных пределов их эксплуатации. Отсутствие данной классификации может говорить либо о том, что полисульфидные герметики применимы в абсолютно любой дорожно-климатической зоне, либо о том, что требуется их градация, с учетом перепадов температур в районе эксплуатации деформационных швов цементобетонных покрытий. В настоящее время, ООО «ПК «САЗИ» разработаны стандарты организации на тиоколовые герметики для деформационных швов цементобетонных покрытий.

В табл. 4 приведены технические показатели качества полисульфидных герметиков.

Таблица 4

## Технические показатели качества полисульфидных герметиков

Показатель	Сазиласт 501	Сазиласт 502	Сазиласт 503
1. Условная прочность при разрыве на образцах, МПа, не менее	1,4	1,1	1,5
2. Относительное удлинение при разрыве на образцах швов, %, не менее	250	350	300
3. Модуль упругости при 100% удлинении на образцах швов, МПа, не менее		0,6	
4. Выносливость, циклов, не менее	35000	40000	35000
5. Водопоглощение, % по массе, не более		0,5	
6. Изменение массы после испытания на старение под воздействием УФ-излучения в течение 1000 часов, %, не более		5	
7. Температура, характеризующая гибкость герметика, °C, не выше		-60	
8. Температура липкости, °C, не ниже		+110	
9. Относительное удлинение в момент разрыва при температуре - 20 °C, %, не менее	150	300	250

В процессе эксплуатации цементобетонных покрытий автомобильных дорог, герметизирующие материалы в деформационных швах подвергаются воздействию различных климатических и эксплуатационных факторов (табл. 5) [29-31]. Большая повторяемость деформационных нагрузок значительно усиливает отрицательный эффект вышеуказанных факторов и ускоряет процесс разрушения герметизирующего материала в деформационных швах цементобетонных покрытий [32-34].

Таблица 5

## Факторы оказывающие влияние на герметизирующие материалы в деформационных швах цементобетонных покрытий

Климатические факторы	Эксплуатационные факторы
Воздействие отрицательных и положительных температур воздуха (большие сезонные перепады температур)	Динамические (переменные) нагрузки (воздействие ТС различной грузоподъемности)
Воздействие ультрафиолетового излучения	Воздействие химических реагентов (при зимнем содержании)
Деформационные нагрузки (вызванные температурным расширением и сжатием плит покрытия)	Механические воздействия при уборке снежно-ледяных отложений
Воздействие осадков	

В табл. 6 приведены температурно-эксплуатационные условия работы цементобетонных покрытий в различных климатических зонах РФ. Можем видеть, что в каждой климатической зоне существует конкретное количество циклов замораживания-оттаивания и определенные годовые и суточные амплитуды колебаний температур, что в свою очередь, должно оказывать влияние на выбор герметика и на геометрию деформационного шва.

Таблица 6  
Анализ температурно-эксплуатационных условий климатических зон РФ

Климатический район	Температура воздуха, °C			Годовая амплитуда воздуха макс/сред	Количество случаев перехода температуры через 0 °C
	Сред. min/max	min	max		
Центральный	-11,6	-52	+39	86	21
	+19,2			30,8	
Центрально-Чернозёмный	-10,6	-38	+42	79	25
	+20,7			31,3	
Восточно-Сибирский	-36,8	-67	+40	107	17
	+19,9			56,7	
Дальневосточный	-43,6	-63	+42	106	31
	+21,8			65,4	
Северный	-6,2	-38	+35	74	39
	+18,3			24,5	
Северо-Кавказский	-5,8	-35	+43	79	-
	+29,4			35,2	
Северо-Западный	-16,5	-16	+36	87	27
	+18,1			34,6	
Поволжский	-13,7	-47	+42	92	18
	+25,6			39,3	
Уральский	-18,6	-48	+43	92	13
	+22,3			40,9	
Волго-Вятский	-14,4	-46	+39	86	24
	+19,6			34,0	
Западно-Сибирский	-23,8	-54	+41	96	17
	+20,1			43,9	
Калининградский	+4,7	-33	+35	20,4	12
	+12,3			7,6	

Анализируя состояние герметика в деформационных швах цементобетонных покрытиях, можно выделить следующие типы дефектов герметизации:

- плохая адгезия герметика к бетону (связана с несоответствием свойств герметика эксплуатационным требованиям или с неправильной предварительной обработкой и заполнением деформационного шва) [35-36];
- выступание герметика из швов;
- изменение формы поверхности герметика в швах;

- образование трещин на поверхности герметика в продольном и поперечном направлениях.

Отсутствие герметика в стыке, изменение его геометрии напрямую связано с выдуванием герметика или его прилипанием к колесам ТС, что также является следствием неправильного выбора типа герметика в данной дорожно-климатической зоне.

Разгерметизация деформационных швов в цементобетонных покрытиях вызвана технологическими и эксплуатационными причинами (табл. 7).

Таблица 7

Причины разгерметизации деформационных швов

Технологические причины	Эксплуатационные причины
Низкое качество герметика в деформационных швах;	Попадание посторонних частиц в деформационные швы
Недостаточное качество подготовки деформационных швов перед их герметизацией	Использование шипованной резины
Наличие влаги во время заполнения герметизирующими материалами	Динамическое воздействие транспортных средств

Разгерметизацию деформационных швов возможно минимизировать, соблюдая рекомендации в части технологии нанесения герметика в деформационный шов. Для этого необходимо выявить зависимость изменения геометрии герметика в шве при многоцикловых деформациях плит цементобетонных покрытий.

Существующие исследования в части влияния сезонного перепада температуры региона на перемещение плит цементобетонных покрытий [37-39] показывают, что при понижении температуры на  $\Delta t$ , плита длиной  $l$  может сократиться на длину  $\Delta l$ . В этой связи, перемещение плиты численно можно посчитать по следующей формуле:

$$\Delta l = \alpha \times E_b \times \Delta t,$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейно-температурного расширения бетона,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$E_b$  – расчетный модуль упругости бетона, МПа;

$\Delta t$  – расчетный перепад температур,  $^{\circ}\text{C}$ .

Анализируя данную зависимость, можем видеть, что значение коэффициента линейно-температурного расширения и расчетного модуля упругости бетона постоянны. Раскрытия деформационных швов напрямую зависят от сезонных и суточных перепадов температуры воздуха в конкретном регионе.

#### 4. Заключение

- В Российской Федерации наибольшее распространение в области герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий имели дорожные полимерно-битумные герметики. Установлено, что наметилась динамика к активному использованию полисульфидных (тиоколовых) герметиков, обладающих сохранением эластичности и прочности в широком диапазоне температур, высокой стойкостью к воздействию УФ-облучения и атмосферным воздействиям. Полисульфидные герметики, в отличии от битумных, не имеют классификации исходя из температурных пределов их эксплуатации.
- Выявлено, что выбор вида герметизирующих материалов зависит от природно-климатических условий эксплуатации, правильного назначения геометрических параметров и времени выполнения работ по герметизации деформационных швов цементобетонных покрытий автомобильных дорог.
- Установлено, что раскрытие деформационных швов напрямую зависят от сезонных и суточных перепадов температуры воздуха в конкретном регионе. На выбор герметизирующих материалов в конкретной климатической зоне должно оказывать влияние, определенные для данного региона, количество циклов замораживания-оттаивания, годовые и суточные амплитуды колебаний температур.

4. При учете данных факторов можно в значительной степени повысить работоспособность деформационных швов цементобетонных покрытий, что позволит увеличить срок их службы.

### Список литературы/ References

1. Ярмолинский В.А., Колушкин В.В., Ярмолинская Е.В. Применение современных герметизирующих материалов для ремонта деформационных швов цементобетонных покрытий: Международный сборник научных трудов. Том 17 / Тихоокеанский государственный университет. Хабаровск, 2017.- С. 124 – 128. [Yarmolinsky V.A., Kolushkin V.V., Yarmolinskaya E.V. The use of modern sealing materials for the repair of expansion joints of cement concrete pavements: International collection of scientific works. Volume 17 / Pacific State University. Khabarovsk, 2017.- P. 124 – 128]
2. Максимов В.А., Ушаков В.В. Обоснование технологии содержания цементобетонных покрытий автомобильных дорог для повышения срока их службы // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – № 2 (32). [Maksimov V.A., Ushakov V.V. Justification of the technology for maintaining cement concrete pavements of highways to increase their service life // Automobile. Road. Infrastructure. – 2022. – No. 2 (32).]
3. Пшембаев М.К., Гиринский В.В., Ковалев Я.Н., Яглов В.Н., Будниченко С.С. Поровая структура дорожного бетона. // Наука и техника. 2016;15(4):298-307. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-4-298-307> [Pshembaev M.K., Girinsky V.V., Kovalev Ya.N., Yaglov V.N., Budnichenko S.S. Porous structure of road concrete. Science and technology. 2016;15(4):298-307. (<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-4-298-307>)]
4. Пшембаев М.К., Ковалев Я.Н., Шевчук Л.И. Анализ напряженного состояния поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий при температурном воздействии // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 4. С. 282–288. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-282-288 [Pshembaev M.K., Kovalev Ya.N., Shevchuk L.I. Analysis of the stress state of the surface layer of road concrete pavements under temperature influence // Science and technology. 2017. Vol. 16, No. 4. P. 282–288. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-4-282-288]
5. Huiyu Xu, Zhihui Hu, Tao Xu. Effects of healing agent on shape memory, mechanical and self-healing properties of joint filler on cement concrete pavement. Construction and Building Materials. Volume 304, 18 October 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124592.
6. Федотов В.В., Лазарев Ю.Г., Новик А.Н., Доброгорская Л.В. Требования к деформационным швам и факторы, способствующие их разрушению. Материалы Международной научно-практической конференции. / Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Комсомольск-на-Амуре, 2019. – С. 355 – 359. [Fedotov V.V., Lazarev Yu.G., Novik A.N., Dobrogorskaya L.V. Requirements for expansion joints and factors contributing to their destruction. Materials of the International Scientific and Practical Conference. / Komsomolsk-on-Amur State University. Komsomolsk-on-Amur, 2019. – P. 355 – 359.]
7. Недоносков А.Б., Дорняк О.Р. Экспериментальное исследование температурных параметров цементобетонного покрытия при свч-нагреве деформационного шва. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Под научной редакцией В.М. Козина. / Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема. Биробиджан, 2023. – С. 135 – 141. [Nedonoskov A.B., Dornjak O.R. Experimental study of the temperature parameters of a cement concrete coating during microwave heating of an expansion joint. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Scientifically edited by V.M. Kozina. / Amur State University named after Sholom Aleichem. Birobidzhan, 2023. – P. 135 – 141.]
8. Хисматуллин А.М., Ахмед Х.А.Х., Аль М.С.А.С., Аль Ш.М.Н.А., Бердник А.В. Продление срока службы деформационных швов. Материалы Международной

- научно-практической конференции. Редколлегия: О.Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. / Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Комсомольск-на-Амуре, 2022. – С. 221 – 224. [Hismatullin A.M., Ahmed H.A.H., Al M.S.A.S., Al Sh.M.N.A., Berdnik A.V. Extending the service life of deformation seams. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Editorial board: O.E. Sysoev (chief editor) [and others]. / Komsomolsky-on-Amur State University. Komsomolsk-on-Amur, 2022. - P. 221-224.]
9. Justyna Stepien, Eva Remisova. Characterization of Hot-Applied Joint Sealants and Their Components in Terms of Their Chemical Composition and Basic Performance Properties. Materials 2023, 16, 6490. DOI: 10.3390/ma16196490
10. Бондарев Б.А., Зайцева Т.М., Саакян А.Г., Лезгина Т.Р. Оценка износа конструкций деформационных швов и пути повышения их долговечности // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. № 4 (10). 126-132 с. [Bondarev B.A., Zaitseva T.M., Saakyan A.G., Lezgina T.R. Assessment of wear of expansion joint structures and ways to increase their durability // Bulletin of PNIPU. Construction and architecture. – 2019. No. 4 (10). P. 126-132]
11. Материалы для дорожного строительства // САЗИ. – URL: <https://www.sazi-group.ru/doroga-sazi>. (дата обращения: 22.04.2024) [Materials for road construction // SAZI. – URL: <https://www.sazi-group.ru/doroga-sazi>. (reference date: 22.04.2024)]
12. Коротков А.С., Гончарова М.А. Деформационные швы и современные методы их совершенствования. Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции / Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр "Вестник науки". Уфа, 2022. – С. 39 – 47. [Korotkov A.S., Goncharova M.A. Expansion joints and modern methods for their improvement. Collection of scientific articles based on the materials of the VIII International Scientific and Practical Conference / Limited Liability Company "Scientific Publishing Center "Bulletin of Science". Ufa, 2022. – P. 39 – 47.]
13. Леденев А.А., Грядунова Ю.Е., Макогон В.К., Внуков Д.Н., Никулин С.С. Модифицированные герметизирующие материалы с улучшенными физико-механическими свойствами для деформационных швов аэродромных покрытий и автомобильных дорог // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 3(52). С. 81–89. [Ledenev A.A., Gryadunova Yu.E., Makogon V.K., Vnukov D.N., Nikulin S.S. Modified sealing materials with improved physical and mechanical properties for expansion joints of airfield pavements and highways // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2022. No. 3(52). P. 81–89]
14. Jinho Kim, Dan Zollinger, Seunghyun Lee. Experimental Study on the Design and Behavior of Concrete Pavement Joint Sealants. Transportation Research Record 2021, Vol. 2675(6) 369–379. DOI: 10.1177/0361198121993472.
15. Грядунова Ю.Е., Леденев А.А., Игуменова Т.И., Никулин С.С. Влияние дисперсных добавок на свойства герметика для швов аэродромного покрытия // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 2. С. 8–12. [Gryadunova Yu.E., Ledenev A.A., Igumenova T.I., Nikulin S.S. The influence of dispersed additives on the properties of sealant for airfield pavement joints // Adhesives. Sealants. Technologies. 2020. No. 2. P. 8–12.]
16. Jinho Kim and Dan Zollinger. Effects of Shape and Bond Strength on Adhesive Failure of Joint Sealants. Transportation Research Record Volume 2675, Issue 1, January 2021, P. 203-212. DOI: 10.1177/0361198120962095.
17. Carbary, L., Johnson, D., & Sutter, L. (2018). Assessing durability of pavement sealants based on surface preparation techniques. ASTM Special Technical Publication, STP 1604, 217-228. <http://doi.org/10.1520/STP160420170135>.
18. Xin, J., Naisheng, G., You, Z., & Yiqiu, T. (2019). Research and development trends of polyurethane modified asphalt. Materials Reports, 33(21), 3686-3694. <http://doi.org/10.11896/cldb.18090011>.

19. Gong, F., Cheng, X., Wang, Q., Chen, Y., You, Z., & Liu, Y. (2023). A Review on the Application of 3D Printing Technology in Pavement Maintenance. *Sustainability* (Switzerland), 15(7). <http://doi.org/10.3390/su15076237>
20. Lv, S., Wang, S., Guo, T., Xia, C., Li, J., & Hou, G. (2018). Laboratory evaluation on performance of compound-modified asphalt for rock asphalt/styrene–butadiene rubber (SBR) and rock asphalt/nano-CaCO<sub>3</sub>. *Applied Sciences*, 8(6), 1009. <http://doi.org/10.3390/app8061009>
21. Zheng, J., You, Z., & Liu, X. (2022). Achievements and Prospects of Functional Pavement: Materials and Structures. *Applied Sciences*. <http://doi.org/10.3390/books978-3-0365-5541-6>
22. Трифонова А.А., Алексеев С.В., Егошин А.М. Актуальные конструкции деформационных швов автодорожных мостов // Сетевой электронный журнал "Транспортные системы и технологии". - 2021. - Т. 7. - №2. - С. 42-54. doi: 10.17816/transsyst20217242-54 [Trifonova A.A., Alekseev S.V., Yegoshin A.M. Resent structures of road bridges' expansion joints // Transportation Systems and Technology. - 2021. - Vol. 7. - N. 2. - P. 42-54. doi: 10.17816/transsyst20217242-54]
23. Loprencipe, G.; Zoccali, P. Ride Quality Due to Road Surface Irregularities: Comparison of Different Methods Applied on a Set of Real Road Profiles. *Coatings* 2017, 7, 59.
24. Loprencipe, G.; Zoccali, P. Use of generated artificial road profiles in road roughness evaluation. *JMT* 2017, 25, 24–33.
25. Bonin, G.; Folino, N.; Loprencipe, G.; Oliverio, R.C.; Polizzotti, S.; Teltayev, B. Development of a Road Asset Management System in Kazakhstan. In Proceedings of the TIS 2017 International Congress on Transport—Infrastructure and Systems, Rome, Italy, 10–12 April 2017.
26. Loprencipe, G.; Pantuso, A.; di Mascio, P. Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. *Sustainability* 2017, 9, 453.
27. Paola Di Mascio, Giuseppe Loprencipe \*, Laura Moretti, Lorenzo Puzzo and Pablo Zoccali. Bridge Expansion Joint in Road Transition Curve: Effects Assessment on Heavy Vehicles. Department of Civil, Constructional and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome. 11 May 2017.31. doi:10.3390/app7060599.
28. Lu Lu, Deying Zhao, Jizhou Fan, Guoqiang Li. A brief review of sealants for cement concrete pavement joints and cracks. *Road Materials and Pavement Design* 23(10):1-25. March 2021. DOI:10.1080/14680629.2021.1898452.
29. Paweł Szymańska, Michał Pikosa, Piotr Nowotarska. Concrete road surface with the use of cement concrete – selected results. 2nd International Joint Conference on Innovative Solutions in Construction Engineering and Management: 16th Lithuanian-German-Polish colloquium and 6th meeting of EURO working group Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering 24 May- 2<sup>nd</sup> International Workshop on flexibility in sustainable construction, ORSDCE 2017, 24-26 April 2017, Poznań-Puszczykowo, Poland. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.035.
30. Tanyıldızı, M., & Karaca, E. O. (2021). The superiorities of concrete roads over asphalt roads. 1st Advanced engineering Days, 48-50. 2021.
31. C. Paglia, C. Mosca. The concrete road pavement durability: a study of 50 years old structures in a south alpine space. 14 International Symposium on Concrete Roads, 25-28 June Krakow, Poland 2023.
32. Xiao D. X., Z. Wu, Longitudinal cracking of jointed plain concrete pavements in Louisiana, *International Journal of Pavement Research and Technology* 11, 2018.
33. Xiang, Q.; Xiao, F. Applications of Epoxy Materials in Pavement Engineering. *Constr. Build. Mater.* 2020, 235, 117529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117529>.
34. Rashid, Muhammad; Ahmad, Naveed; Ahmed, Ahtsham. (2020). The effect of using jute fiber on deformation resistance of asphalt concrete.
35. Ahmad, Mushtaq; Al-Dala'ien, Rayah; Beddu, Salmia; Itam, Zarina. (2021). ThermoPhysical Properties of Graphite powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete. *Engineered Science*. Doi: 10.30919/es8d569.

36. Pan, Pan; Wu, Shaopeng; Hu, Xiaodi; Liu, Gang; li, bo. (2017). Effect of Material Composition and Environmental Condition on Thermal Characteristics of Conductive Asphalt Concrete. Materials. DOI: 10.218.10.3390/ma10030218.
37. Pugin K.G.. (2022). The Use of Polymer Materials in the Composition of Asphalt Concrete. 150-155. 10.21741/9781644901755-27.
38. Mikhasek, Andrey; Ivanov, Boris. (2017). Modified composite material developed on the basis of no-fines asphalt concrete. MATEC Web of Conferences. 106. 03022. Doi: 10.1051/matecconf/201710603022.
39. Karahancer, Sebnem. (2019). Reçine Kolofan odifikasiyonunun Bitüm ve Sıcak Karışım Asfalt Üzerindeki Etkisi. Süleyman emirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ergisi. 23. 252-260. 10.19113/sdufenbed.518077.

### Информация об авторах

**Вадим Александрович Максимов**, аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

Email: *Maksimov.Vadim.007@yandex.ru*, ORCID: 0009-0000-1881-6639

**Виктор Васильевич Ушаков**, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

Email: *madi-ushakov@mail.ru*

### Information about the authors

**Vadim A. Maksimov**, post-graduate student, Moscow Automobile and Highway State Technical University, Moscow, Russian Federation

Email: *Maksimov.Vadim.007@yandex.ru*, ORCID: 0009-0000-1881-6639

**Victor V. Ushakov**, doctor of technical sciences, professor, Moscow Automobile and Highway State Technical University, Moscow, Russian Federation

Email: *madi-ushakov@mail.ru*



УДК: 691.542

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7

EDN: GINAGZ

## **Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности**

**Е.Г. Гуляков<sup>1</sup>, В.Г. Хозин<sup>1</sup>, И.В. Боровских<sup>1</sup>, Ю.М. Ганеева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

<sup>2</sup> Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ Казанский

научный центр РАН,

г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Развитие технологии получения высокопрочных бетонов – одно из наиболее актуальных научных направлений бетоноведения в настоящее время. Традиционное решение, способствующее достижению высоких прочностных свойств бетона, — это повышение активности цемента, которое достигается увеличением тонкости помола. Однако, тонкомолотые цементы высокой удельной поверхности обладают повышенной водопотребностью, что приводит к большому расходу воды и пластификаторов в составе бетона. Применение цементов низкой водопотребности позволяет совместить высокую активность и низкую водопотребность вяжущего. Важным при этом является достижение высокой удельной поверхности цементов низкой водопотребности при наименьших энергозатратах на помол. Цель работы заключается в оценке размолоспособности бездобавочного портландцемента при получении из него цемента низкой водопотребности в сравнении с тонкомолотым цементом равного времени помола. Для этого решались следующие задачи: получение тонкомолотого цемента и цемента низкой водопотребности с разными видами суперпластификаторов при одинаковом времени помола бездобавочного портландцемента, а также определение зависимости удельной поверхности от времени помола и распределения частиц по размерам полученных молотых вяжущих.

**Результаты.** В работе представлены результаты исследований влияния водных растворов суперпластификаторов, в сравнении с их сухими порошками на размолоспособность промышленного портландцемента, выявлены оптимальные показатели концентрации ПАВ при высокой удельной поверхности цементов низкой водопотребности.

**Выводы.** По результатам исследования, наиболее эффективным интенсификатором помола портландцемента является водный раствор суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров, позволяющий при концентрации 0,5% от массы цемента достичь максимальных показателей удельной поверхности среди исследованных составов цементов низкой водопотребности.

**Ключевые слова:** цемент, тонкомолотые цементы, цементы низкой водопотребности, суперпластификаторы, интенсификация помола, размолоспособность

**Для цитирования:** Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Ганеева Ю.М. Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 77-91, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7, EDN: GINAGZ

# The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water demand cements

**E.G. Gulyakov<sup>1</sup>, V.G. Khozin<sup>1</sup>, I.V. Borovskikh<sup>1</sup>, Y.M. Ganeeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,

<sup>2</sup>Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The development of technology for producing high-strength concrete is one of the most relevant scientific areas of concrete science at present. The traditional solution to achieving high strength properties of concrete is to increase the activity of cement, which is achieved by increasing the grinding fineness. However, finely ground cements with high specific surface area have increased water demand, which leads to high consumption of water and plasticizers in the concrete composition. The use of low water demand cements makes it possible to combine high activity and low water demand of the binder. It is important to achieve a high specific surface area of cements with low water demand at the lowest energy consumption for grinding. The purpose of the work is to evaluate the grindability of additive-free Portland cement when producing low water demand cement from it in comparison with finely ground cement of equal grinding time. To do this, the following problems were solved: obtaining finely ground cement and cement of low water demand with different types of superplasticizers at the same grinding time of additive-free Portland cement, as well as determining the dependence of the specific surface area on the grinding time and the particle size distribution of the resulting ground binders.

*Results.* The paper presents the results of studies of the influence of aqueous solutions of superplasticizers, in comparison with their dry powders, on the grindability of industrial Portland cement, and identifies the optimal indicators of surfactant concentration at a high specific surface area of low water demand cements.

*Conclusions.* According to the results of the study, the most effective grinding intensifier of Portland cement is an aqueous solution of a superplasticizer based on polycarboxylate ethers, which allows, at a concentration of 0.5% by weight of cement, to achieve the maximum specific surface area among the studied compositions of low water demand cements.

**Keywords:** cement, finely ground cements, low water demand cements, superplasticizers, grinding intensification, grindability

**For citation:** Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Ganeeva Y.M. The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water demand cements // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 77-91, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7, EDN: GINAGZ

## 1. Введение

Цементные вяжущие в современном мире являются одним из основных компонентов бетона, определяющим его прочностные свойства. Самым востребованным является бездобавочный портландцемент, свойства и технологии получения которого постоянно совершенствуются. Известны тонкомолотые цементы (ТМЦ), которые имеют высокую удельную поверхность, что повышает их активность по сравнению с исходным цементом. Достоинства ТМЦ сопровождаются их недостатками: высокие энергозатраты при помоле и большая удельная поверхность, которая приводит к ускоренной агрегации тонких частиц при хранении, а также к повышенной водопотребности бетонной смеси, что в свою очередь требует повышенного расхода воды и пластификации. В то же время, одними из наиболее эффективных являются цементы низкой водопотребности (ЦНВ), получаемые путем совместного помола портландцемента или цементного клинкера с минеральными наполнителями, или без них, в присутствии пластификатора [1]. В ЦНВ

совмещены более высокая удельная поверхность и низкая водопотребность вяжущего, причем проявляемый эффект выше, чем при раздельном применении ТМЦ и пластификаторов.

Процесс измельчения является одним из основных в производстве большинства строительных материалов, представляя собой чрезвычайно сложное явление, в котором, наряду с механическими, существенное значение имеют физико-химические факторы [2,3]. Они же влияют и на изменение технологических свойств материалов в результате измельчения [4-6].

Из всех строительных материалов цемент занимает первое место как по объему производства, так и по значению процесса измельчения в формировании его технических свойств [7,8]. Поэтому исследованию влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на измельчение цемента в литературе удалено особенно большое внимание [9,10]. Лабораторными опытами и производственной практикой установлено значительное интенсифицирующее действие ПАВ на помол цемента [11-13], что обуславливает их широкое применение в цементной промышленности. ПАВ адсорбируются на свежей поверхности частиц цемента, образующейся в результате их разрушения с разрывом электровалентных связей, обволакивают цементные частицы, тем самым уменьшают силы притяжения между ними и снижают степень агломерации или вообще устраниают ее [4].

Введение таких распространенных добавок, как триэтаноламин (ТЭА), сульфитно-спиртовая барда (ССБ) не только способствует интенсификации помола и оптимизации гранулометрического состава [14], но существенно улучшает физико-механические свойства цементов, изменения их пластичность, тепловыделение в процессе гидратации, механическую прочность и морозостойкость [15,16]. Даже добавление воды (до 1% от массы цемента), которая наряду с дезагрегирующими свойствами обладает также способностью значительно понижать прочность твердых тел, позволяет увеличить удельную поверхность цемента при помоле.

В качестве интенсификаторов помола цемента или цементного клинкера часто применяются суперпластификаторы [17,18], как в виде сухого порошка, так и их водные растворы [19-21]. Органические суперпластификаторы для бетонов, как ПАВ, проявляют эффект Ребиндера, являясь сильными интенсификаторами помола [22,23]. При этом можно ожидать больший эффект интенсификации измельчения именно с водными растворами суперпластификаторов по сравнению с их твердыми аналогами. В этом варианте и сама вода-растворитель должна облегчать измельчение, а растворённые в ней молекулы ПАВ будут иметь лучший «доступ» к поверхности твердых минеральных компонентов ЦНВ и большую способность проникать в различные дефекты, вплоть до их вершин, увеличивая расклинивающее действие [24].

В настоящее время актуальны изыскания в области применения суперпластификаторов поликарбоксилатного типа в качестве интенсификаторов помола при получении ЦНВ, а именно поиск оптимальных параметров длительности помола и концентрации суперпластификатора. Цель нашего исследования – это получение цементного вяжущего, в котором совмещался бы эффект низкой водопотребности с высокой гидравлической активностью, определяемой тонкостью его помола. При этом может реализоваться как аддитивный результат, так и синергический. Безусловно, это должен быть ЦНВ-100, с высокой удельной поверхностью частиц, «покрытых» слоем (возможно, мономолекулярным) адсорбированного, точнее механически «второго», суперпластификатора. При этом цифра «100» в обозначениях ТМЦ-100 и ЦНВ-100 означает 100%-ое содержание цемента или цементного клинкера в составе вяжущего.

Теоретически для этого необходимо измельчить цементный клинкер до наноразмерных частиц, которые, как известно, в пределе не имеют объемных свойств. Для помола до наноразмеров (5-10 нм) применяют высокоэнергетические планетарные, шаровые и вибрационные мельницы. Однако в режиме работы промышленных мельниц, в частности, ударно-истирающего действия – шаровых, вибрационных, получить наноразмерные частицы в практически значимом объеме весьма проблематично.

Технико-экономическая целесообразность сверхтонкого измельчения в них заставляет остановиться на каком-то предельном интервале, ограниченном

энергозатратами на единицу получаемого продукта. Да и сама физикохимия процесса тонкого измельчения твердых веществ вносит закономерные ограничения в получении наноразмерного порошка цемента. И тем не менее, именно технология ЦНВ может решить задачу получения сверхвысокопрочного вяжущего при достижении оптимальной энерго-интенсивности помола и оптимального количества вводимого при этом суперпластификатора.

Цель работы заключается в оценке размолоспособности бездобавочного портландцемента при получении из него цемента низкой водопотребности в сравнении с тонкомолотым цементом равного времени помола. Для этого решались следующие задачи: получение тонкомолотого цемента и цемента низкой водопотребности с разными видами суперпластификаторов при одинаковом времени помола бездобавочного портландцемента, а также определение зависимости удельной поверхности от времени помола и распределения частиц по размерам полученных молотых вяжущих.

## 2. Материалы и методы

### *Материалы исследований*

Для получения тонкомолотых бездобавочных цементов (ТМЦ-100) и цементов низкой водопотребности (ЦНВ-100) применяли промышленный бездобавочный портландцемент (ПЦ), а при получении ЦНВ-100 использовали суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров и на основе натриевой соли полиметиленнафтилинсульфокислоты и их водные растворы.

Характеристика используемых материалов и веществ:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н с нормальной густотой цементного теста НГ=29% и удельной поверхностью  $S_{уд}=3940 \text{ см}^2/\text{г}$ , производства АО «Волга Цемент» (г. Вольск), соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020;

- суперпластификатор «Полипласт ПК» (тип R) на основе поликарбоксилатных эфиров в форме водорастворимого порошка белого цвета, с насыпной плотностью 670 кг/м<sup>3</sup>, соответствующий показателям ТУ 20.59.59-109-58042865-2020, производства ГК «Полипласт».

- суперпластификатор «Полипласт СП-1» на основе натриевых солей полиметиленнафтилинсульфокислот (по химической природе аналогичен «разжижителю» С-3), соответствующий ТУ 5870-005-58042865-05 с изм. 1, 2, производства ГК «Полипласт». Представляет собой водорастворимый порошок светло-коричневого цвета с pH 8±1, массовой долей сухого вещества ≥ 90%, содержание хлоридов ≤ 0,1 %.

Отдельно готовились водные растворы суперпластификаторов в виде 30%-го и 50%-го растворов.

### *Методы исследований*

Количественные составы исходных смесей для получения ЦНВ-100 принимались с учетом содержания суперпластификатора по сухому веществу к массе портландцемента – от 0,5 до 1,5% с шагом 0,25%.

Учитывая, что суперпластификаторы «СП-1» и «Полипласт ПК» (тип R) (далее «ПК-R») используются в товарной форме в виде порошка или водного раствора, в начале было целесообразно сравнить их эффективность, тем более, что ранее [24] было показано, что водный раствор СП не уступает «сухому», как интенсификатор помола ПЦ. Поэтому вначале было определено влияние самой воды на интенсивность помола, затем оценена размолоспособность ПЦ с двумя видами суперпластификаторов с одинаковой концентрацией по сухому веществу – 0,5% к массе портландцемента. При этом также сравнили сухие порошки СП с их водными растворами.

Составы ЦНВ-100 (с массой ПЦ, равной 1 кг) предварительно тщательно перемешивались в сферической чаше. Далее готовая смесь каждого состава загружалась в вибрационную мельницу СВМ-3. Для получения ТМЦ-100 также брали 1 кг ПЦ. Время помола составляло: 2, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 20 мин. После каждого интервала помола производилась выгрузка молотого продукта (порошка).

Мельница вибрационная СВМ-3 предназначена для периодического измельчения порошкообразного или зернистого материала в лабораторных условиях, а также для моделирования процесса измельчения на промышленных мельницах. Объем помольной

камеры СВМ-3 равен 0,1 м<sup>3</sup>, имеется водяное охлаждение, загрузка материала по массе составляет от 1 до 3 кг.

Принцип действия вибрационных мельниц основан на приведении массы шаров и измельчаемого материала в круговое движение посредством вибратора, связанного с электродвигателем. Частицы материала, попадая в пространство между шарами, испытывают ударные и сдвигающие нагрузки.

Оценка удельной поверхности и среднего размера частиц ЦНВ-100 и ТМЦ-100 осуществлялась на приборе дисперсионного анализа ПСХ-10А, принцип действия которого основан на методе Козени-Кармана (метод КК). Газопроницаемость слоя порошка определяется по продолжительности фильтрации через него воздуха при фиксированном начальном и конечном разрежении в рабочем объеме прибора. Для расчета удельной поверхности и среднего размера частиц используют удельный вес (плотность) материала порошка, массу порошка и высоту его слоя в кювете. Прибор ПСХ-10А имеет диапазона измерений по удельной поверхности от 200 до 60000 см<sup>2</sup>/г и по среднемассовому размеру частиц от 0,1 до 250 мкм, погрешность измерений при этом составляет ±1,5%.

Для определения термостойкости суперпластификатора применялся прибор синхронного термического анализа STA449-F3 ("NETZSCH", Германия). Исследуемый образец массой 11,8 мг нагревали от комнатной температуры до 300°C в корундовых тиглях с перфорированной крышкой вместе с пустым тиглем в качестве образца сравнения при скорости нагревания 10 К/мин в потоке аргона 50 мл/мин. Обработка результатов проводилась с использованием программного обеспечения NETZSCH Proteus (Version 6.0.0).

Распределение частиц по размерам (РЧР) и средний размер частиц (dcp) получаемых порошков ТМЦ-100 и ЦНВ-100 определяли на лазерном анализаторе частиц Partica LA-950V2 фирмы «Horiba». При измерении была применена УЗВ-обработка для дезагрегации частиц.

Принцип действия анализатора основан на лазерной дифракции, которая заключается в том, что угол света, рассеянный частицей, зависит от размера этой частицы. Крупные частицы рассеивают свет на малые углы, и наоборот, мелкие частицы рассеивают на большие углы. Интенсивности и углы рассеянного света, полученные от совокупности частиц, могут быть преобразованы в распределение частиц по размерам. Анализатор позволяет определять размеры частиц в интервале от 10 нм до 3 мм.

### 3. Результаты и обсуждение

Для начала был проведен сравнительный анализ влияния воды, как ПАВ, на размолоспособность портландцемента (рис. 1). Для лучшей интерпретации полученных данных на приборе ПСХ-10А далее они были представлены в виде графических зависимостей удельной поверхности и среднего размера частиц от времени помола и содержания суперпластификатора.

Кривая помола ЦЕМ I 42,5 Н без добавки воды показывает равномерный рост удельной поверхности с 3940 см<sup>2</sup>/г до 6240 см<sup>2</sup>/г при времени помола до 13 минут (рис. 1). Далее, при 16 минутах помола, наблюдается снижение удельной поверхности до 5836 см<sup>2</sup>/г, что является закономерным явлением при тонком сухом измельчении минеральных веществ, вследствие процесса агрегирования порошков, тормозящим их помол [4]. При диспергировании образуются свободные связи и активные центры на поверхности частиц, а при их контакте реализуются ван-дер-ваальсовы силы, концентрация которых возрастает с увеличением удельной поверхности порошков. К тому же, в процессе помола частицы имеют неравновесную аутогезию, а именно их взаимодействие в зонах контакта между собой обуславливает рост аутогезии. При этом прочность агрегатов сыпучего материала растет пропорционально числу контактов на единицу площади сечения материала. Поэтому сухой помол портландцемента для получения ТМЦ-100 в вибромельнице СВМ-3 свыше 10-13 минут нецелесообразен.

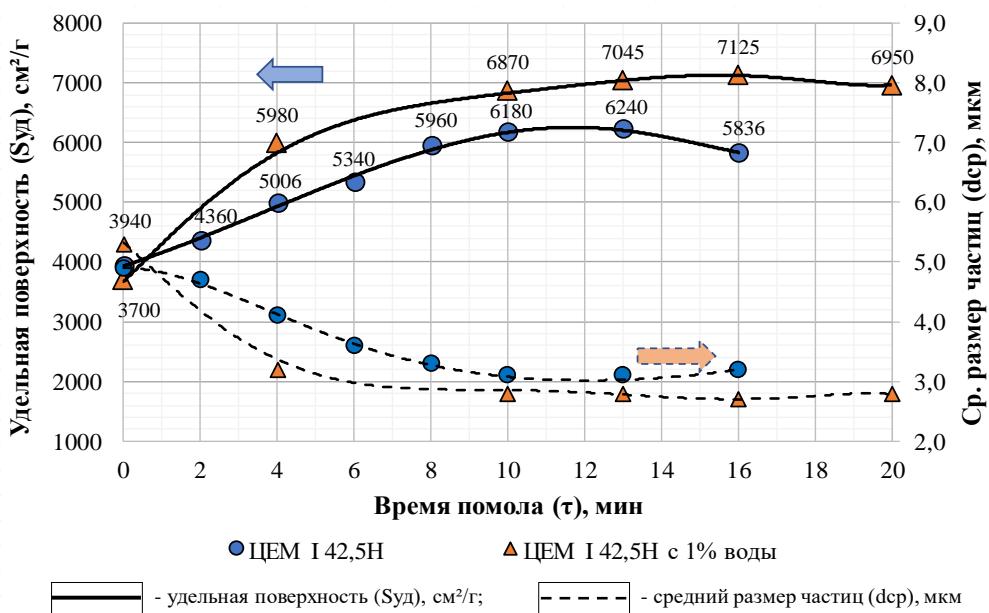


Рис. 1 – Зависимость удельной поверхности ТМЦ-100 ( $S_{уд}$ ) и среднего размера частиц ( $d_{cp}$ ) от времени помола ( $\tau$ ) ЦЕМ I 42,5Н в интервале 2–16 мин без и с добавкой 1% воды (иллюстрация авторов)

Fig. 1 – Dependence of the specific surface area of finely ground cement TMC-100 ( $S_{сп}$ ) and the average particle size ( $d_{cp}$ ) on the grinding time ( $\tau$ ) of Portland cement CEM I 42.5N in the range of 2–16 minutes without and with the addition of 1% water (illustration by the authors)

Далее рассмотрим кинетику помола портландцемента с добавкой 1% воды для получения ТМЦ-100. Добавка 1% воды от массы ПЦ значительно повышает размолоспособность. Уже начиная со 2-й минуты помола, кривая совместного помола ЦЕМ I 42,5 Н с 1% воды опережает по удельной поверхности кривую помола ПЦ без добавки. При 4-х минутах помола прирост составляет 974 см<sup>2</sup>/г (+19,5%), при 10-ти минутах – 690 см<sup>2</sup>/г (+11,2%), далее разница увеличивается, и при 16 минутах она уже равна 1289 см<sup>2</sup>/г (+22,1%). Наибольшая достигнутая удельная поверхность равна 7125 см<sup>2</sup>/г при 16 минутах помола ЦЕМ I 42,5Н с 1 % воды, а дальнейшее увеличение времени помола до 20-ти минут не приводит к повышению удельной поверхности. Полученные данные по среднемассовому размеру частиц ТМЦ-100 в обоих вариантах помола коррелируют с показаниями удельной поверхности: снижение  $d_{cp}$  с увеличением  $S_{уд}$ , и наоборот.

При введении суперпластификаторов в количестве 0,5% от массы цемента в виде сухого порошка и 30%-го водного раствора для получения ЦНВ-100 наблюдается повышение размолоспособности ПЦ по сравнению с ТМЦ-100 (рис. 2, кривая 1). Помол ЦЕМ I 42,5Н совместно с «СП-1» приводит к интенсификации помола, причем до 8 минут более эффективно с сухим порошком (кривая 4), а с 8 до 16 минут с водным раствором суперпластификатора (кривая 5). При этом, наибольшая удельная поверхность, равная почти 7000 см<sup>2</sup>/г, достигается при 13 минутах помола с 30%-ым водным раствором «СП-1».

При получении ЦНВ-100 с суперпластификатором «ПК-R» (кривые 2, 3) значительно увеличивается размолоспособность ПЦ по сравнению с предыдущими составами, что наглядно проявляется после 4 минут помола. Во всем интервале времени помола размолоспособность ПЦ с сухим порошком «ПК-R» (кривая 2) ниже, чем с 30%-ым водным раствором «ПК-R» (кривая 3), применяя который возможно достичь максимальной удельной поверхности 9740 см<sup>2</sup>/г при 20 минутном помоле. С 4 до 16 минут помола разница между кривыми 2 и 3 составляет от 300 до 500 см<sup>2</sup>/г. После 16 минут помола ПЦ с «ПК-R» в виде сухого порошка наблюдается снижение удельной поверхности – с 8493 см<sup>2</sup>/г до 8110 см<sup>2</sup>/г при 20 минутном помоле.

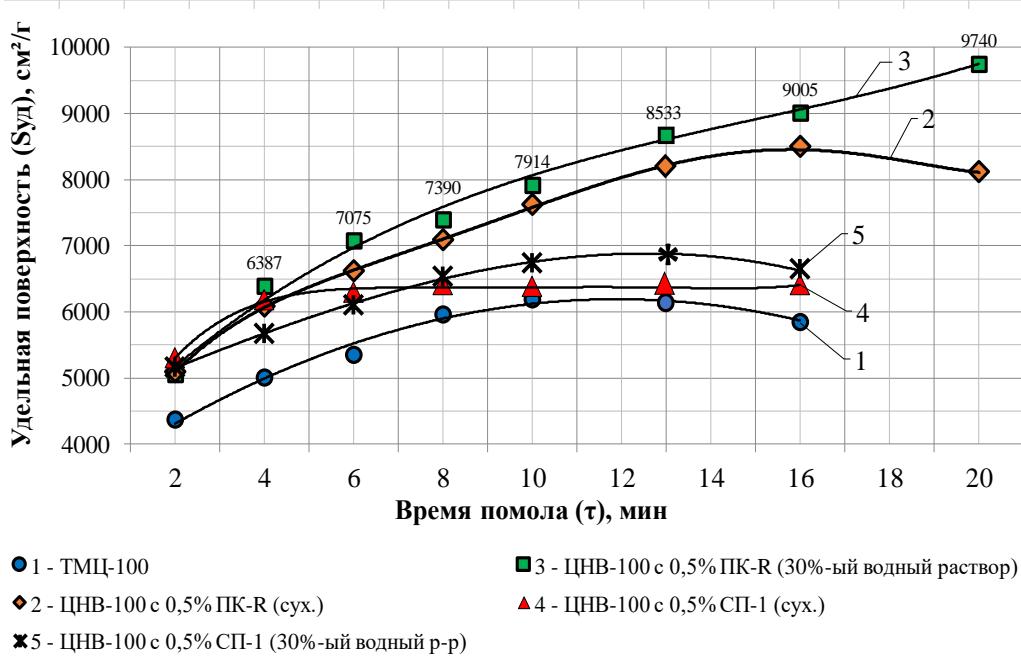


Рис. 2 – Сравнительная размолоспособность ПЦ с суперпластификаторами «СП-1» и «ПК-Р» (иллюстрация авторов)  
Fig. 2 – Comparative grindability of Portland cement with superplasticizers «SP-1» and «PC-R» (illustration by the authors)

Большая размолоспособность портландцемента при помоле в присутствии водного раствора СП объясняется «вкладом» воды в эффект Ребиндера (адсорбционное снижение прочности твердых тел) и предотвращением агрегирования при высокой удельной поверхности [25].

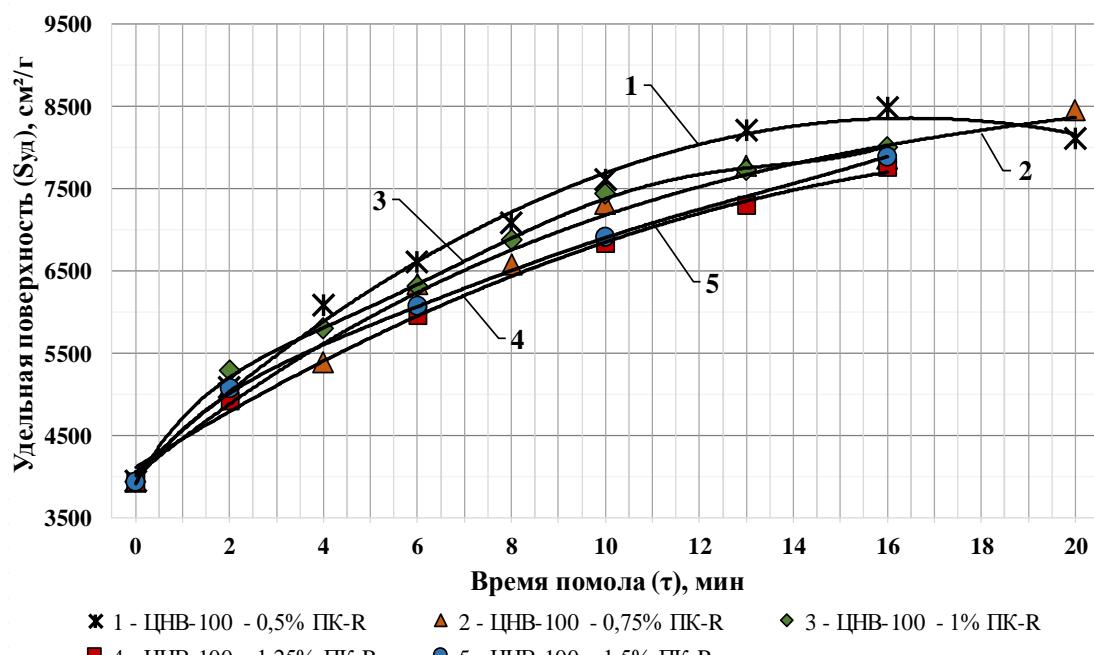


Рис. 3 – Размолоспособность ПЦ с суперпластификатором «ПК-Р» в виде сухого порошка (иллюстрация авторов)  
Fig. 3 – Grindability of Portland cement with superplasticizer «PC-R» in the form of dry powder (illustration by the authors)

Результат влияния на помол концентраций сухого суперпластификатора «ПК-Р» свыше 0,5% при получении ЦНВ-100 показан на рис. 3. Так, из кривых

размолоспособности ПЦ, видно, что она закономерно снижается. Наибольшей удельной поверхностью при времени помола от 2 до 16 минут обладает ЦНВ-100 с 0,5% ПК-Р (кривая 1), на 20-й минуте помола происходит снижение  $S_{уд}$ , по-видимому, вследствие агрегации частиц. Меньшими показателями размолоспособности  $S_{уд}$  обладают составы ЦНВ-100 с 1,25% и 1,5% ПК-Р (кривые 4 и 5 соответственно). Разница с ЦНВ-100 с 0,5% ПК-Р и 1,5% ПК-Р составляет 500-600  $\text{см}^2/\text{г}$ .

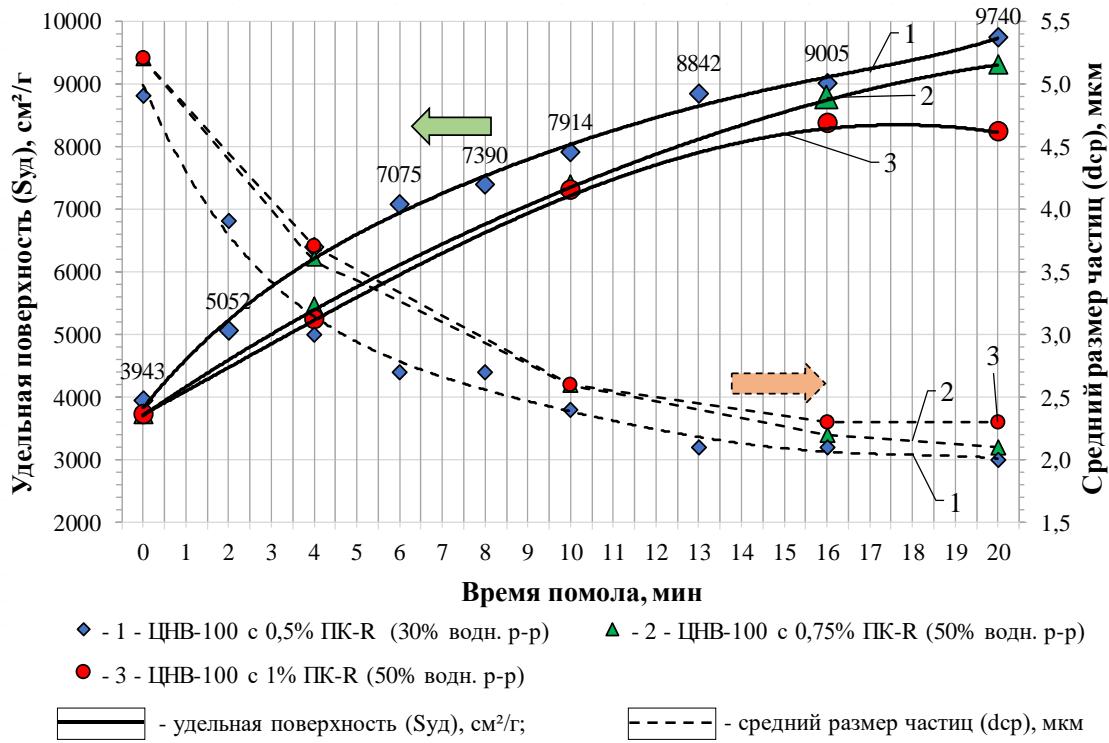


Рис. 4 – Размолоспособность ПЦ с суперпластификатором «ПК-Р» в виде водного раствора (иллюстрация авторов)

Fig. 4 – Grindability of Portland cement with superplasticizer «PC-R» in the form of an aqueous solution (illustration by the authors)

Аналогичные результаты получены при помоле ЦЕМ I 42,5Н с водными растворами «ПК-Р» (рис. 4). Закономерность сохраняется – с повышением концентрации суперпластификатора выше 0,5% размолоспособность ПЦ снижается. Наибольшие показатели  $S_{уд}$  достигнуты при количестве 0,5% ПК-Р в виде 30%-го водного раствора (кривая 1). ЦНВ-100 с концентрациями «ПК-Р» 50%-го водного раствора, равными 0,75% и 1% от массы ПЦ, обладают меньшими показателями  $S_{уд}$  – их разница относительно состава ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-Р» в виде 30%-го водного раствора составляет 400-950  $\text{см}^2/\text{г}$  и 570-1500  $\text{см}^2/\text{г}$ , соответственно, во всем интервале времени помола от 2 до 20 мин. Показатели среднемассового размера частиц так же коррелируют с зависимостью удельной поверхности от времени помола.

По зависимости  $S_{уд}$  от содержания суперпластификатора «ПК-Р» при 6, 10 и 16 минутах помола, представленной на рис. 5, можно сделать вывод, что при концентрации суперпластификатора от 0,5 до 1% «ПК-Р» от массы цемента удельная поверхность ЦНВ-100 при 16 минутах времени помола выше при получении с водными растворами «ПК-Р», чем при помоле с сухим порошком данного СП. При 6 и 10 минутах помола данная закономерность соблюдается только при концентрации 0,5% «ПК-Р». Это согласуется с данными [4], где приведено объяснение этому явлению. Учитывая, что вода является сильнейшим ПАВ, а понижение поверхностной энергии с ней наибольшее, что согласуется с основными положениями физико-химической механики твердых тел, добавление других ПАВ приводит к тому, что ими покрывается часть свежеобразованных поверхностей, затрудняя доступ к ним молекул воды. В результате этого суммарное действие ПАВ и воды при кратковременном помоле уменьшается. При длительном же измельчении цемента количество влаги, находившейся первоначально на поверхности

материала, недостаточно, чтобы покрыть всю вновь образующуюся поверхность. В результате интенсифицируются процессы плотного агрегирования, и удельная поверхность начинает уменьшаться. Добавки ПАВ в этом случае действуют положительно, компенсируя покрытием «молекулярными оболочками» новообразованных поверхностей.

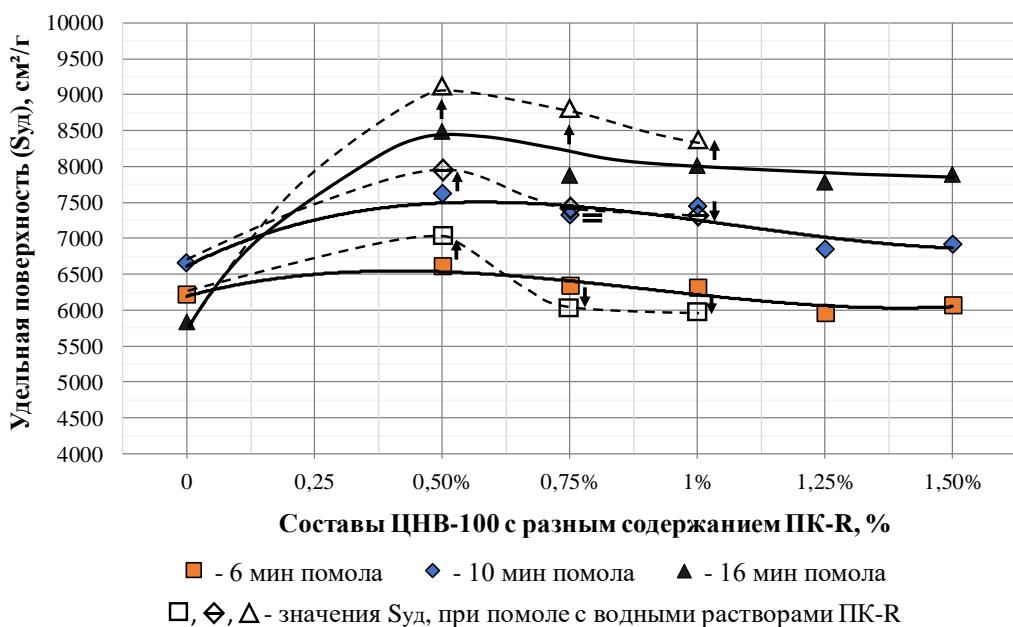


Рис. 5 – Зависимость удельной поверхности ( $S_{уд}$ ,  $\text{cm}^2/\text{г}$ ) цементов низкой водотребности от содержания суперпластификатора «ПК-Р», %, при 6, 10 и 16 мин помола (иллюстрация авторов)

Fig. 5 – Dependence of the specific surface area ( $S_{уд}$ ,  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) of low water demand cements on content of superplasticizer «PC-R», %, at 6, 10 and 16 min of grinding (illustration by the authors)

Характерно (рис. 5), что наибольшие значения  $S_{уд}$  при трёх интервалах помола (6, 10, 16 мин помола) достигаются при 0,5% сухого СП, а далее, свыше 0,5%, наблюдается постепенное снижение удельной поверхности получаемого ЦНВ-100. Причиной влияния добавок СП на снижение размолоспособности ПЦ с увеличением его концентрации может быть его плавление и деструкция в процессе помола, в результате чего происходит «слипание» частиц, приводящее также к агломерации частиц цемента, как и при получении ТМЦ-100. Так, в работе [26] указано, что в точках контакта мелющих тел на площади  $10^{-5}\text{-}10^{-7} \text{ м}^2$  возможно возникновение температурных вспышек до  $1000^\circ\text{C}$  продолжительностью около  $10^{-4}\text{ с}$  и с давлением 1500 МПа. Еще ранее, с учетом протекающих при измельчении физических явлений, Тиссен, Майер и Хайнеке предложили модель «магма-плазмы» механохимических процессов, которая подкрепляет возникновение своего рода «микровзрывов» на контакте трущихся тел в процессе измельчения. Согласно модели, выделяющаяся при ударе или истирании энергия, вследствие слабой теплопроводности тел, приводит не только к локальному подъему температуры и сублимации вещества, но и к возникновению такого состояния, в котором вещество находится в виде ионов и электронов (плазма). Это неизбежно должно привести к плавлению и термомеханической деструкции органического ПАВ, каковым является суперпластификатор «ПК-Р». Возможны даже механохимические реакции.

Результаты синхронного термического анализа суперпластификатора «ПК-Р», представленные в виде кривых ТГ, ДТГ и ДСК на рис. 6, свидетельствуют о его плавлении при температуре  $62^\circ\text{C}$  и начале деструкции уже при температурах порядка  $80^\circ\text{C}$ . Безусловно, плавление суперпластификатора в процессе измельчения ЦНВ-100 должно способствовать образованию контактов между частицами цемента более прочных, чем ван-дер-ваальсовые взаимодействия, и тем самым «способствовать» их агрегированию.

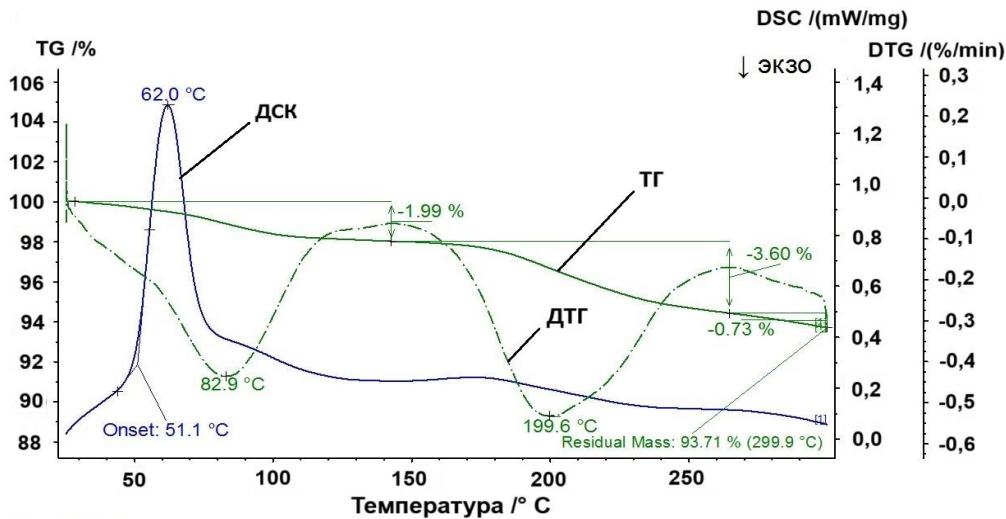


Рис. 6 – Кривые ДСК, ДТГ и ТГ суперпластификатора «Полипласт ПК» (тип R)  
(иллюстрация авторов)

Fig. 6 – DSC, DTG and TG curves of the superplasticizer «Poliplast PC» (type R)  
(illustration by the authors)

Анализ удельной поверхности на приборе ПСХ-10А не дает полноценной оценки дисперсной структуры, поэтому с помощью лазерного анализатора Partica LA-950V2 «Horiba» было исследовано распределение частиц по размерам (РЧР) исходного портландцемента ЦЕМ I 42,5Н и полученных из него при 16-минутном помоле – ТМЦ-100 и ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-R». При этом суперпластификатор для получения ЦНВ-100 вводился в первом варианте – в виде сухого порошка, во втором – в виде 30%-го водного раствора. На рис. 7 представлены графики РЧР соответствующих нумерованных образцов.

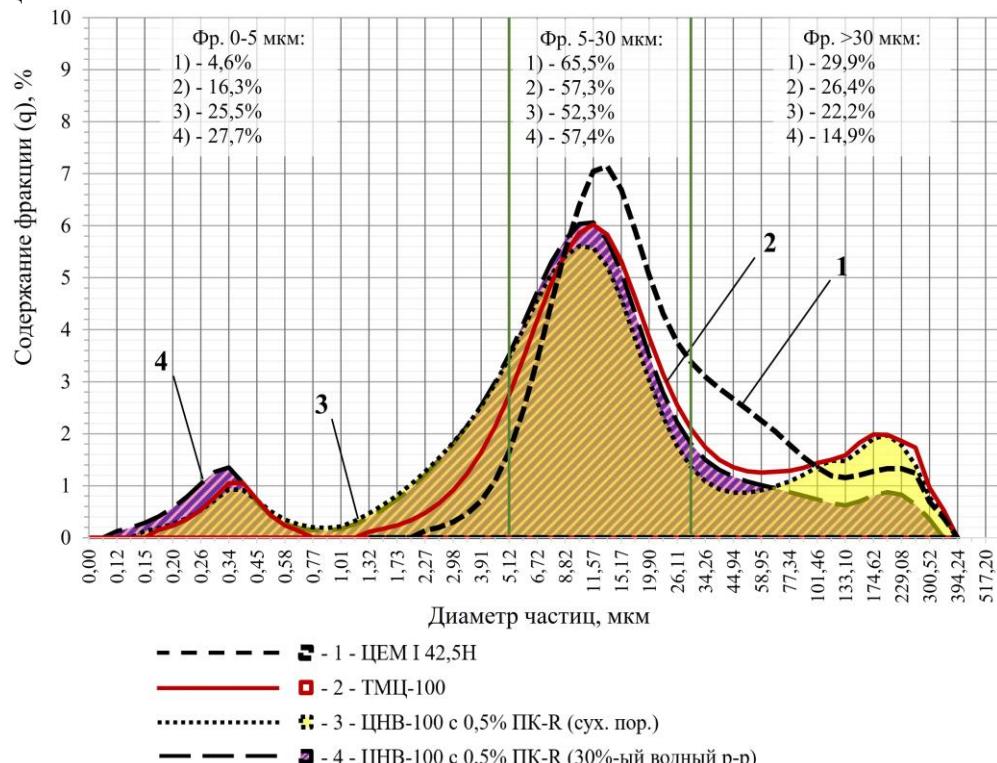


Рис. 7 – Графики РЧР исходного ЦЕМ I 42,5Н и полученных из него ТМЦ-100 и ЦНВ-100 (с 0,5% «ПК-R») при 16 мин помола, измеренных с применением УЗВ-обработки (иллюстрация авторов)

Fig. 7 – Particle size distribution graphs of the original Portland cement ЦЕМ I 42.5H and the finely ground cement ТМЦ-100 and low water demand cements ЦНВ-100 (with 0.5% «PC-R») obtained from it at 16 min of grinding, measured using ultrasonic treatment (illustration by the authors)

При помоле исходного ПЦ характерно, что графики РЧР меняются от бимодального в тримодальные (ТМЦ-100 и ЦНВ-100). Известно, что самая тонкая фракция частиц до 5 мкм активнее всего участвует в гидратации в ранние сроки твердения цемента (до 7 сут), марочную прочность обеспечивают частицы размером от 5 до 30 мкм (до 28 сут), а фракция частиц >30 мкм практически не играет роли в активной стадии гидратации как в ранние сроки твердения, так и при достижении марочной прочности цемента [27-29]. Чем меньше размер частиц цемента, тем выше прочность бетона [30]. Так, состав ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-Р», введенного в виде 30%-го водного раствора, (заштрихованная область 4, рис. 7) обладает наибольшим количеством частиц фракции 0-5 мкм, вторым по количеству частиц фракции 5-30 мкм (меньше исходного ПЦ на 8%) и наименьшим содержанием частиц больше 30 мкм. Это соответствует критериям высокой гидратационной активности в ранние сроки твердения и достаточно оптимального соотношения частиц крупнее 30 мкм к фракции частиц 5-30 мкм. При этом наблюдается тенденция к повышению дисперсности в следующем ряду в порядке увеличения: 1) ЦЕМ I 42,5Н ( $S_{уд}=3940 \text{ см}^2/\text{г}$ ) → ТМЦ-100 ( $S_{уд}=5836 \text{ см}^2/\text{г}$ ) → ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-Р» (сух. пор.) ( $S_{уд}=8493 \text{ см}^2/\text{г}$ ) → ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-Р» (30%-ый водный раствор) ( $S_{уд}=9005 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

#### 4. Заключение

На основании проведенного исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Помол портландцемента без добавок свыше 13 минут приводит к агрегированию частиц, измеренному по удельной поверхности порошка на приборе ПСХ-10А. Совместный помол портландцемента с водой в количестве 1% при получении ТМЦ-100 позволяет интенсифицировать процесс, что подтверждается удельной поверхностью – большей на 11-22%, чем без добавки воды, при времени помола от 4 до 16 минут.

2. Более эффективным интенсификатором помола является суперпластификатор «Полипласт ПК» (тип R) на основе поликарбоксилатных эфиров, чем «Полипласт СП-1» на основе натриевых солей полиметиленнафтилинсульфокислот. Причем применение их водных растворов целесообразнее – достигается большая удельная поверхность ЦНВ-100.

3. Увеличение доли добавки сухого суперпластификатора «ПК-Р» свыше 0,5% не приводит к интенсификации помола – концентрационные зависимости удельной поверхности при 6, 10 и 16 мин имеют максимум при 0,5% суперпластификатора, а далее (до 1,5%) монотонно снижаются. Вероятной причиной этого является плавление и деструкция органического суперпластификатора в точках контакта зерен ПЦ при помоле, вызывающая «склеивание» (слипание) частиц и, вследствие этого, «химическое» агрегирование. Возможность этого механохимического эффекта допускают результаты синхронного термического анализа ПК-Р.

4. Оценка дисперсной структуры на лазерном анализаторе с использованием дезагрегирующей УЗВ-обработки показала, что графики РЧР исходного ПЦ, ТМЦ-100 и ЦНВ-100 меняются соответственно от бимодального до тримодального. Самая активная фракция частиц до 30 мкм больше всего содержитя в составах ЦНВ-100. Наибольшая дисперсность достигается при получении ЦНВ-100 с 0,5% «ПК-Р», примененного в виде 30%-го водного раствора, что подтверждается максимальными показателями удельной поверхности и содержанием тонкой части до 5 мкм среди анализируемых составов с одинаковым временем помола.

Таким образом, наибольшая размолоспособность портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н для получения ЦНВ-100 с высокой удельной поверхностью, среди исследованных составов, достигается с применением 30%-го водного раствора суперпластификатора «Полипласт ПК» (тип R) при его концентрации 0,5%.

#### Список литературы / References

1. Токарский А.Я., Егоров В.Н., Ганзен Е.В., Кузьмина Т.К., Несветайло В.М. Высокопрочный цемент и его применение при возведении монолитных железобетонных конструкций // Строительное производство. – 2023. – № 1. – С. 60-64. – DOI 10.54950/26585340\_2023\_1\_60. – EDN PRYAFZ. [Tokarskiy A.Ya.,

- Egorov V.N., Ganzen E.V., Kuzmina T.K., Nesvetailo V.M. High-strength cement and its use in the construction of monolithic reinforced concrete structures // Construction production. – 2023. – № 1. – P. 60-64. – DOI 10.54950/26585340\_2023\_1\_60. – EDN PRYAFZ.]
2. Леденев А.А., Козодаев С.П., Загоруйко Т.В., Перцев В.Т., Черкасов С.В., Николенко С.Д. Механо-химические процессы и физико-химическая активность цементно-минеральных дисперсных систем в технологии бетона // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 3(56). – С. 105-120. – DOI 10.24866/2227-6858/2023-3/105-120. – EDN FUQOVI. [Ledenev A., Kozodaev S., Tzagoruiko T., Pertsev V., Tcherkasov S., Nikolenko S. Mechanical and chemical processes and physical and chemical activity of cement-mineral dispersed systems in concrete technology. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2023;(3):105–120. – DOI 10.24866/2227-6858/2023-3/105-120. – EDN FUQOVI]
  3. Панферов А.А., Ивахнюк Г.К., Федоров Н.Ф., Маметнабиев Т.Э., Дринберг А.С. Электрофизическая интенсификация измельчения и моделирование процесса смешения сыпучих неорганических веществ // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2022. – № 60(86). – С. 18-22. – DOI 10.36807/1998-9849-2022-60-86-18-22. – EDN EKFMLH. [Andrey A. Panferov, Grigory K. Ivakhnyuk, Nikolay F., Fedorov, Tazhir E. Mametnabiev, Andrey S. Drinberg Electrophysical intensification and simulation of grinding and mixing of inorganic materials // News of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2022;(60): 18-22. – DOI 10.36807/1998-9849-2022-60-86-18-22. – EDN EKFMLH]
  4. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов – Стройиздат. – М.: Стройиздат, 1972. – 239 с.: ил. [Khodakov, G. S. Fine grinding of construction materials – Stroyizdat. – M.: Stroyizdat, 1972. – 239 p.: ill.]
  5. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Пуршева А.В., Ахметзянова М.А., Худовекова Е.А. Цементы низкой водопотребности центробежно-ударного помола // Строительные материалы. – 2019. – № 1-2. – С. 23-27. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. – EDN YYFQXB. [Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Pursheva A.V., Akhmetzyanova M.A., Khudovekova E.A. Low water demand cements of centrifugal impact grinding // Building materials. – 2019. – №. 1-2. – P. 23-27. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. – EDN YYFQXB.]
  6. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К., Кашапов Р.Р., Баишев Д.И. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 1. – С. 53-57. – EDN YLSUVN. [Khozin V.G., Khohryakov O.V., Nizamov R.K., Kashapov R.R., Baishev D.I. Experience in nano-modification of low water demand cements // Industrial and Civil Engineering. – 2018. – № 1. – P. 53-57. – EDN YLSUVN.]
  7. Серова Р.Ф., Рахат М.Б. Влияние тонкости помола сырьевых компонентов на активность клинкера // Труды университета. – 2019. – № 4(77). – С. 133-137. – EDN HLSRVE. [Serova R.F., Rakhat M.B. Influence of grinding fineness of raw materials on the activity of clinker // Proceedings of the University. – 2019. – № 4(77). – P. 133-137. – EDN HLSRVE.]
  8. Khozin V., Khokhryakov O., Nizamov R. A "carbon footprint" of low water demand cements and cement-based concrete // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, April, 29 – May, 15, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012105. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012105. – EDN TIEGCD.
  9. Котов С., Сивков С. Современные высоко эффективные интенсификаторы помола цемента // Актуальные вопросы инновационной экономики. – 2014. – № 6. – С. 36-43. [Kotov S., Sivkov S. Modern highly efficient intensifiers of cement grinding // Actual issues of innovation economy. – 2014. – № 6. – P. 36-43.]

10. Chipakwe, Vitalis & Semsari Parapari, Parisa & Karlkvist, Tommy & Rosenkranz, Jan & Chelgani, Saeed. A critical review on the mechanisms of chemical additives used in grinding and their effects on the downstream processes // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. 8148-8162. – DOI 10.1016/j.jmrt.2020.05.080.
11. Батраков В.Г., Башлыков Н.Ф., Бабаев Ш.Т., Сердюк В.Н., Фаликман В.Р., Несветайло В.М. Бетоны на вяжущих низкой водопотребности // Бетон и железобетон. – 1988. – № 11. – С. 4-6. [Batrakov V.G., Bashlykov N.F., Babaev Sh.T., Serdyuk V.N., Falikman V.R., Nesvetailo V.M. Concrete with low water demand binders // Concrete and reinforced concrete. – 1988. – № 11. – P. 4-6.]
12. Zan, S.R.M. & Ishak, K.E.H.K.. A study of different grinding aids for low-energy cement clinker production // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2023. Vol. 123. 471-478. – DOI: 10.17159/2411-9717/2702/2023.
13. Несмейнов Н.П., Бражник Ю.В., Королева Л.А., Белоус А.С., Денисова Е.М. Методы интенсификации процесса измельчения цементного клинкера и добавок // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : Межвузовский сборник статей / Под редакцией В.С. Богданова. Том Выпуск XX. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 122-126. – EDN JZFTYO. [Nesmeyanov N.P., Brazhnik Yu.V., Koroleva L.A., Belous A.S., Denisova E.M. Methods for intensifying the process of grinding cement clinker and additives // Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: Interuniversity collection of articles / Edited by V.S. Bogdanov. Volume Issue XX. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov, 2021. – P. 122-126. – EDN JZFTYO.]
14. Черкасова Н.С. Влияние интенсифицирующей и суперпластифицирующей добавок на размалываемость и строительно - технические свойства цемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Посвящена 165-летию В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 3097-3101. – EDN IWLLS. [Cherkasova N.S. The influence of intensifying and superplasticizing additives on grindability and construction and technical properties of cement // International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov: Dedicated to the 165th anniversary of V.G. Shukhov, Belgorod, May 01–20, 2018. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. – P. 3097-3101. – EDN IWLLS.]
15. Gharehghehlagh Hojjat, Chehreghani Sajjad, Seyyedi Behnam. EFFECTS OF VARIOUS GRINDING AIDS DOSAGE ON COMMINTION EFFICIENCY AND CEMENT CHARACTERISTICS // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2023. 38. 69-82. – DOI: 10.17794/rgn.2023.1.7.
16. Шпак Д.А. Исследование интенсификаторов помола клинкера на свойства получаемого цемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 186-191. – EDN QQWYTZ. [Shpak D.A. Study of clinker grinding intensifiers on the properties of the resulting cement // International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhova, Belgorod, May 16–17, 2023. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. – P. 186-191. – EDN QQWYTZ.]
17. Янюк Е.А. Влияние современных технологий производства цемента с интенсификаторами помола на эффективность действия химических добавок // Технологии бетонов. – 2018. – № 9-10(146-147). – С. 34-39. – EDN UZEVMI. [Yanyuk E.A. The influence of modern cement production technologies with grinding

- intensifiers on the effectiveness of chemical additives // Concrete Technologies. – 2018. – № 9-10(146-147). – P. 34-39. – EDN UZEVMI.]
18. He Yan, Liu, Shuhua, Luo Qi, Liu Wenbin, Xu Mingfeng. Influence of PCE-type GA on cement hydration performances // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 302. 124432. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124432.
  19. Njiru Eric, Muthengia Jackson, Munyao Onesmus, Mutitu Daniel, Musyoki David. Review of the Effect of Grinding Aids and Admixtures on the Performance of Cements // Advances in Civil Engineering. 2023. 1-9. – DOI: 10.1155/2023/6697842.
  20. Weibel Martin, Mishra Ratan. Comprehensive understanding of -grinding aids. // ZKG INTERNATIONAL. 2014. Vol. 6. 28-39.
  21. Yang Jianyu, Li Guanglin, Yang Weijun, Guan Junfeng. Effect of Polycarboxylic Grinding Aid on Cement Chemistry and Properties // Polymers. 2022. Vol. 14. 3905. – DOI 10.3390/polym14183905.
  22. Урбанов А.В., Потапова Е.Н. Применение модификаторов свойств цемента в качестве интенсификаторов помола // Успехи в химии и химические технологии. – 2023. – № 5. – С. 179-182. [Urbanov A.V., Potapova E.N. Application of cement quality improvers as grinding aids // Advances in chemistry and chemical technology. – 2023. – № 5. – P. 179-182.]
  23. Янюк Е.А. Влияние современных технологий производства цемента с интенсификаторами помола на эффективность действия химических добавок // Технологии бетонов. – 2018. – № 9-10(146-147). – С. 34-39. – EDN UZEVMI. [Yanyuk E.A. The influence of modern cement production technologies with grinding intensifiers on the effectiveness of chemical additives // Concrete Technologies. – 2018. – № 9-10(146-147). – P. 34-39. – EDN UZEVMI.]
  24. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. – М.: Монография. Издательство АСВ, 2021. – 366 с. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Sibgatullin I.R. Carbonate-based low water demand cements. – M.: Monograph. Izdatelstvo ASV, 2021. – 366 p.]
  25. Prziwara Paul, Kwade Arno. Grinding aids for dry fine grinding processes – Part I: Mechanism of action and lab-scale grinding // Powder Technology. 2020. 375. – DOI 10.1016/j.powtec.2020.07.038.
  26. Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г. Механохимия твердых неорганических веществ. Успехи химии. – 1971. – Т. 41. – №10. – С. 51-61. [Boldyrev V.V., Avvakumov E.G. Mechanochemistry of solid inorganic substances. Advances in chemistry. – 1971. – Т. 41. – № 10. – Р. 51-61.]
  27. Злобин И.А., Zysk K.H., Борисов И.Н., Мандрикова О.С. Влияние вида применяемого помольного агрегата на гранулометрический состав продукта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 164-168. – EDN SXDKAF. [Zlobin I.A., Zysk K.H., Borisov I.N., Mandrikova O.S. The influence of the type of grinding unit used on the granulometric composition of the product // BULLETIN OF BSTU NAMED AFTER V.G. SHUKHOV. – 2014. – № 5. – P. 164-168. – EDN SXDKAF.]
  28. Ehikhuenmen Samuel, Igba Tobit, Busari Abdullah, Oyebisi Solomon. The influence of cement fineness on the structural characteristics of normal concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 640. 012043. – DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012043.
  29. Kim, Daegeon. Effect of Adjusting for Particle-Size Distribution of Cement on Strength Development of Concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. 1-6. – DOI 10.1155/2018/1763524.
  30. Ehikhuenmen Samuel, Igba Tobit, Busari Abdullah, Oyebisi Solomon. The influence of cement fineness on the structural characteristics of normal concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 640. 012043. – DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012043.

### Информация об авторах

**Гуляков Евгений Гениадьевич**, аспирант, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022*

**Хозин Вадим Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X*

**Боровских Игорь Викторович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: borigor83@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1223-3138*

**Ганеева Юлия Муратовна**, доктор химических наук, главный научный сотрудник, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ Казанский научный центр РАН, г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: ganeeva@iopc.ru, ORCID: 0000-0002-0940-9377*

### Information about the authors

**Evgeny G. Gulyakov**, post-graduate student, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

*E-mail: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022*

**Vadim G. Khozin**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

*E-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X*

**Igor V. Borovskikh**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

*E-mail: borigor83@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1223-3138*

**Yulia M. Ganeeva**, doctor of chemical sciences, chief scientist, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

*E-mail: ganeeva@iopc.ru, ORCID: 0000-0002-0940-9377.*

УДК: 691.3:666.72.05

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.8

EDN:HPPDFF



## Влияние золошлаковой смеси на технические показатели с использованием регрессивного анализа и фазовый состав керамического кирпича

В.З. Абдрахимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный экономический университет,  
г. Самара, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. В Российской Федерации, для эффективной деятельности заводов по выпуску керамических кирпичей, заметно сократились первосортные сырьевые материалы. Их можно заменять на отходы производств, имеющие подобные химические составы и технологические показатели с природным традиционным сырьем. Поэтому, прежде чем использовать в выпуске керамического кирпича отходы производств их целесообразно исследовать на химические, минералогические и фракционные составы и свойства технологического характера. Предприятия экологически передовых стран извлекли пользу из такого применения отходов производств в строительных материалах еще в качестве инструментария для защиты экосистем. Цель работы: исследовать с использованием регрессионного анализа влияние золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев на технические показатели и фазовый состав керамического кирпича. Задачами исследования являются: подобрать оптимальный состав для изготовления кирпича не ниже марки М125; использовать регрессионный метод анализа, обеспечивающий применение требуемых модельных уравнений, которые окажут содействие в комплектовании изделия с эффективными показателями.

**Результаты.** Выявлено, что керамический кирпич М125 из межсланцевой глины при температуре 1050°C без отощителей получить невозможно. Установлено, что с повышением в керамической массе содержания золошлаковой смеси до 20% технические показатели кирпича улучшаются.

**Выводы.** В статье использовался регрессионный метод анализа, позволяющий выбрать необходимые модельные уравнения, которые помогут определить керамические массы для получения керамического кирпича, обладающего эффективными показателями и для прогнозирования результатов, не вошедших в эксперимент. Введение золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев в керамическую массу 20% способствует образованию муллита и диопсида, которые повышают прочность кирпича

**Ключевые слова:** золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев, межсланцевая глина, керамический кирпич, технические показатели, регрессионный анализ, фазовый состав

**Для цитирования:** Абдрахимов В.З. Влияние золошлаковой смеси на технические показатели с использованием регрессивного анализа и фазовый состав керамического кирпича // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 92-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.8, EDN: HPPDFF

# The influence of the ash and slag mixture on technical parameters using regression analysis and the phase composition of ceramic bricks

V.Z. Abdrikhimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State University of Economics  
Samara. Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* In the Russian Federation, for the efficient operation of factories producing ceramic bricks, first-class raw materials have been noticeably decreased. They are advisable to be replaced with industrial waste having identical chemical compositions and technological parameters similar the natural traditional raw materials. Therefore, before using industrial wastes in the production of ceramic bricks, it is advisable to examine them for chemical, mineralogical and fractional compositions and technological properties. Enterprises in environmentally advanced countries have benefited from this use of industrial waste in construction materials as a tool for protecting ecosystems. The purpose of the work: to investigate the influence of the ash and slag mixture, received from the combustion of oil shale, on the technical parameters and phase composition of ceramic bricks. The investigation is carried out using regression analysis. The objectives of the study are: to select the optimal composition for the manufacture of bricks of at least M125 grade, to use a regression analysis method that ensures the selection of the required model equations that will assist in completing the product with effective indicators. *Results.* It was revealed that it is impossible to obtain ceramic brick M125 from interstitial clay at a temperature of 1050 °C without thinners. It was found that with an increase of the content of ash and slag mixture in the ceramic mass to 20%, the technical characteristics of the brick improve. *Conclusions.* The article used a regression analysis method that allows you to select the necessary model equations that will help determine the ceramic masses to obtain ceramic bricks with effective parameters and to predict the results that were not included in the experiment. The introduction of an ash and slag mixture from the combustion of oil shales into a ceramic mass of 20% contributes to the formation of mullite and diopside, which increase the strength of the brick.

**Keywords:** ash and slag mixture from combustion of oil shales, inter-shale clay, ceramic brick, technical parameters, regression analysis, phase composition

**For citation:** Abdrikhimov V.Z. Influence of ash and slag mixture on technical parameters using regressive analysis and phase composition of ceramic bricks // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 92-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.8, EDN: HPPDFF

## 1. Введение

К одной из наиболее заметных препятствий для производства и расширения ассортимента керамических материалов в XXI в. относится истощение сырьевых материалов: легкоплавких и тугоплавких глинистых связующих, отощителей, интенсификаторов спекания, выгорающих добавок и т.д. [1-3]. Замена природных первичных сырьевых материалов на крупнотоннажные отходы топливно-энергетического комплекса (ТЭК), объем которых составляет более 2 млрд., а территория, на которой размещены эти отходы более 22000 га [4-6]. В работах [7-9] был показан рециклинг отходов горючих сланцев в производство кармических материалов.

Горючие сланцы – это минеральное вещество осадочного генезиса, в котором практически одинаково распространена органика сапропелевой природы (кероген) [10]. Запасы горючих сланцев по равнозначности (в эквиваленте) газа и смолы значительно превышают природные запасы нефти и газа [11]. Следом за США и Бразилией по залежам горючих сланцев Россия находится на третьем месте. Около 200 месторождений горючих сланцев находится в Российской Федерации, в том числе 143,1 млрд т в Европейской части, а 849 млрд. т на Северо-Востоке и Восточной Сибири [10].

Общие запасы Волжского сланцевого бассейна, находящиеся на глубине от 50 до 300 м, в настоящее время составляют более 55 млрд. т. Интерес к применению горючих сланцев и, соответственно, к утилизации полученных отходов в минувшие десятилетия существенно возрос. Необходимо отметить, что многие страны стали применять горючие сланцы не только в энергетической отрасли, но и в химической.

Возможность результативно применять горючие сланцы как местные низкокачественные источники углеводородов позволяют повысить общее количество углеводородного сырья России [12, 13].

Исследования по анализу химического состава неорганической части горючих сланцев продемонстрировали, что исследуемая минеральная часть сланцев в основным состоит из оксидов:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ , т.е. этот химический состав идентичен составам сырьевых материалов для производства керамических изделий строительного направления [16].

К отрасли строительных материалов относятся стеновые керамические материалы, которые смогут утилизировать в качестве сырья крупнотоннажные отходы ТЭК,

Цель работы: исследовать с использованием регрессионного анализа влияние золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев на технические показатели и фазовый состав керамического кирпича.

Задачами исследования являются: подобрать оптимальный состав для изготовления кирпича не ниже марки М125; использовать регрессионный метод анализа, обеспечивающий применение требуемых модельных уравнений, которые окажут содействие в комплектовании изделия с эффективными показателями.

## 2. Материалы и методы

*Методика исследования.* В данной статье используемые отходы производств исследовались на элементарные составы и микроструктуры при помощи микроскопа электронного растрового фирмы Jeol. Япония - JSM 6390A. Использовались аншлифы и прозрачные шлифы, а также иммерсионные жидкости под микроскопом МИН-8 и МИН-7 для получения петрографических данных.

Оценки фазовых составов посредством рентгенодифрактометрического анализа реализовывались с применением  $\text{CuK}\alpha$  – излучения и  $\beta$ -фильтра на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3. Для подтверждения фазового состава, полученного рентгенодифрактометрическим анализом были востребованы ИК – спектры поглощения, полученные с привлечением спектрофотометра “Spekord-75JR”. Образцы были приготовлены с вазелиновым маслом на подобии суспензии порошка.

В рекомендуемой статье применялся регрессионный анализ, который служит опорным методом на современном этапе математической статистики.

*Сырьевые материалы.* Для утилизации техногенного сырья в генерации керамического кирпича применялись в качестве: связующего - межсланцевая глина, отощителя и селективно выгорающего модификатора – золошлаковая смесь.

Основные свойства и показатели техногенного сырья горючих сланцев представлены: в табл. 1 - усредненные химические оксидные составы межсланцевой глины и золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев, в табл. 2 –поэлементные составы, в табл. 3 – фракционные, в табл. 4 – свойства технологического характера, на рис. 1 – микроструктуры, а на рис. 2 – минеральные составы.

Поэлементный химический состав подтверждает оксидный химический состав с повышенным содержанием в исследуемых техногенных сырьевых материалах: оксида кремния, оксида алюминия, оксида железа и оксида кальция (табл. 1 и 2).

Таблица 1  
Усредненный химический оксидный состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{R}_2\text{O}$	П.п.п.
1. Межсланцевая глина	45,40	13,87	5,60	11,3	2,3	3,5	18,03

2. Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	34,40	10,35	8,78	20,28	3,38	2,83	19,98
Примечание: п.п.п. – потери при прокаливании; $R_2O = K_2O + Na_2O$							

Таблица 2

## Поэлементный химический состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
1. Межсланцевая глина	5,73	52,85	0,46	1,04	7,20	18,66	1,75	10,53	3,35
2. Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	7,44	47,96	0,81	1,93	5,65	16,9	1,53	12,2	5,58

Таблица 3

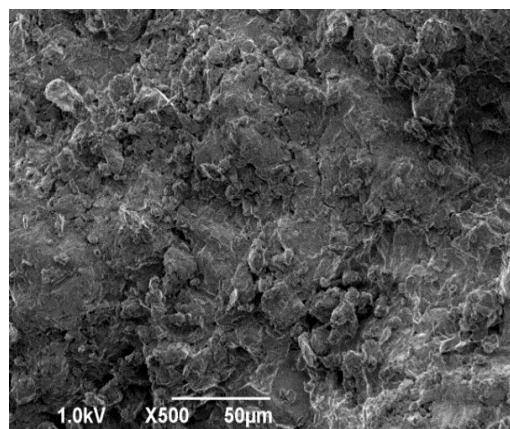
## Фракционный состав сырьевых компонентов

Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
1. Межсланцевая глина	7	10	13	15	55
2. Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	16,84	33,41	32,49	12,68	4,58

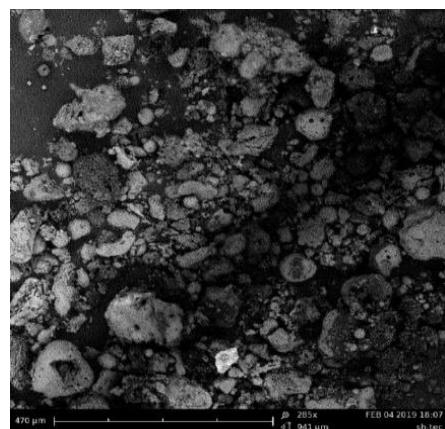
Таблица 4

## Технологические показатели сырьевых компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. Межсланцевая глина	1200	1270	1310	1350
2. Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	2000	1300	1340	1380



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура сырьевых компонентов: а) – межсланцевая глина; б) – Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев. Увеличение x500 (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Microstructure of raw materials components: a) – inter-shale clay; b) - Ash-slag mixture from combustion of oil shales. Magnification x500 (illustration by the authors)

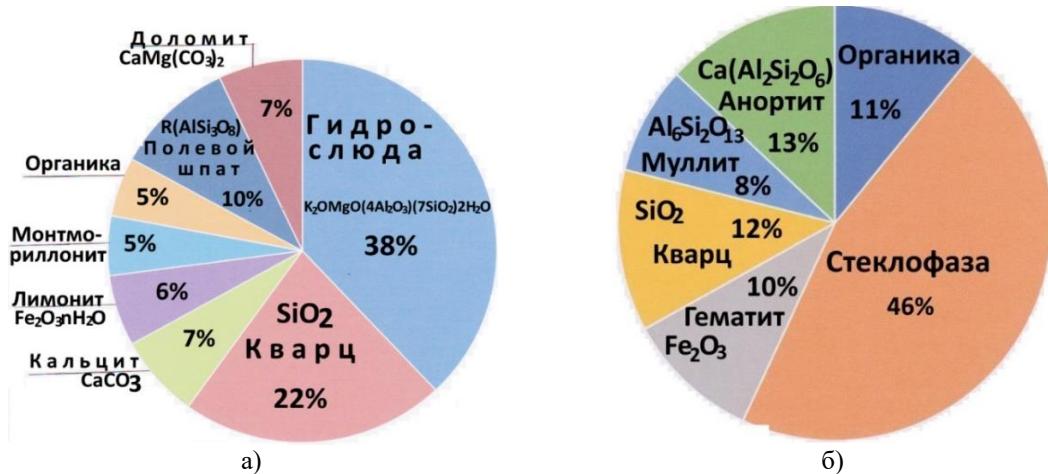


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых компонентов:

а) – межсланцевая глина; б) золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев  
(иллюстрация авторов)

Fig. 2. Mineralogical composition of raw materials components: a) – inter-shale clay; b) ash-slag mixture from combustion of oil shales (illustration by the authors)

**Межсланцевая глина.** Рассматриваемый пластичный (связующий) ингредиент, являющийся основной составной частью керамической композиции, зарождается при извлечении из недр земли горючих сланцев. Высвобождаемый глинистый ингредиент утилизируется в отвал [8, 9]. Утилизируемый ингредиент, имея число пластичности от 17 до 21, его следует отнести к группе – среднепластичное сырье с плотностью 2,55-2,62 г/см<sup>3</sup>.

**Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев.** Утилизировалась в формате отоштетеля и селективно выгорающей добавки (2000 ккал/кг – теплотворная способность смеси, табл. 4) золошлаковая смесь для генерации кирпича. Горючие сланцы при сгорании формируют золошлаковые смеси, технические и технологические показатели (табл. 1-4, рис. 1-2).

**Технология получения керамического кирпича.** Технологии получения керамического кирпича состоят из следующих этапов: 1) высушивание сырьевых компонентов; 2) измельчение; 3) перемешивание компонентов; 4) увлажнение; 5) формование изделий; 6) сушка; 7) обжиг. С тех пор технология не менялась, исчез только ручной труд.

Производство кирпича осуществлялось: а) подсушка сырьевых материалов до влажности не более 3-5%; б) измельчение сырьевых материалов до прохождения сквозь сито (1x1 мм); в) тщательное перемешивание компонентов согласно рецепту, приведенного в табл. 5; г) увлажнение керамической массы до влажности 20-22% (в зависимости от количества связующего). Из полученной композиции формировали образцы (размером в кирпич 250x120x65 см), которые термообрабатывались в сушильном шкафу до конечной влажности не более 5%. Полученный полуфабрикат (или кирпич-сырец) направляли в муфельную печь для термообработки при 1050°C и выдержки с продолжительностью 1 часа. Технические (физико-механические) показатели представлены в табл. 6.

Таблица 5

## Составы керамических масс и их пластичность

Компонент	Содержание отходов, мас. %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Межсланцевая глина (X <sub>1</sub> )	100	96	92	88	84	80	76	72	68
Золошлаковая смесь (X <sub>2</sub> )	–	4	8	12	16	20	24	28	32
Пластичность, безразмерная величина	18	18	16	15	14	12	11	10	9

Таблица 6

## Технические показатели кирпича

Показатель	Составы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прочности при сжатии ( $Y_1$ ), МПа	10,2	10,5	10,8	11,7	12,7	13,8	13,5	12,3	11,8
Прочности при изгибе ( $Y_2$ ), МПа	2,3	2,4	2,4	2,6	2,8	3,2	3,0	2,8	2,6
Морозостойкость ( $Y_3$ ), циклы	16	16	18	22	25	28	26	24	20
Водопоглощение ( $Y_4$ ), %	14,7	14,2	13,5	13,0	12,8	12,5	12,8	13,1	13,7
Марочность кирпича	M100	M100	M100	M100	M125	M125	M125	M100	M100

*Регрессивный метод анализа.* В предлагаемой статье привлекался регрессивный анализ, принадлежащий к краеугольным методам математической статистики для установления потенциальных как малодоступных, так и косвенных (скрытых) контактов между наблюдаемыми сведениями [17, 18].

Рекомендуемый метод анализа достаточно широко освещен в работах [17, 18], в которых было продемонстрировано, как этот метод предоставляет возможность получить необходимые сведения от неполных известных контактов и выбрать оптимальные модельные уравнения. Предложенные уравнения крайне продуктивны для подбора результативных составов керамических масс. В табл. 7 проиллюстрированы показатели параметров линейных функций  $Y_i$ , где  $i=1\dots 4$  и величин регрессионного анализа для основных четырех этапов исследования.

Таблица 7

## Значения величин регрессионного анализа по техническим показателям для четырех этапов

Значение	Для уравнения регрессии по:			
	Прочность при сжатии, МПа, ( $Y_1$ )	Прочность при изгибе, МПа, ( $Y_2$ )	Морозостойкость, циклы, ( $Y_3$ )	Водопоглощение, %, ( $Y_4$ )
Значение коэффициента $b_0$	18,7074	4,1572	43,3652	10,1462
Значение коэффициента $b_1$	-0,08088	-0,01764	-0,2587	0,03839
Значение коэффициента $b_2$	0	-0,25	-1	-0,5
Средняя ошибка аппроксимации A%	6,17	145,59	70,39	61,31
Значение стандартной ошибки регрессии S	1,076	5,845	23,687	11,698
Значение коэффициента детерминации $R^2$	0,4687	-285,4721	-20,579	-194,4927
F-наблюдаемое значение	2,647	-2.99	-2,861	-2,985

Как видно из табл. 7, технические показатели образца при обжиге 1050°C определяли на основании показателей четырех этапов (по базисным показателям): на первом этапе анализировалась роль интерференции золошлаковой смеси ( $X_2$ ): а) на прочность при сжатии ( $Y_1$ ), б) второй этап - на прочность при изгибе ( $Y_2$ ), в) третий – на морозостойкость ( $Y_3$ ), четвертый - на водопоглощение ( $Y_4$ ).

Для установления уравнения регрессии:  $Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$  воспользовались методом наименьших квадратов [17-19]. Для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 18,7074 - 0,08088X_1 + 0X_2 \quad (1)$$

для прочности при изгибе:

$$Y_2 = 4,1572 - 0,01764X_1 - 0,25X_2 \quad (2)$$

для морозостойкости:

$$Y_3 = 43,3652 - 0,2587X_1 - 1X_2 \quad (3)$$

для водопоглощения:

$$Y_4 = 10,1462 + 0,03839X_1 - 0,5X_2 \quad (4)$$

Для анализа формата корреляции с моделью эксперимента определяли коэффициент детерминированности  $R^2$ , вычисленный при сопоставлении прогнозируемых и фактических функций  $Y$ . В табл. 7 указаны значения коэффициентов детерминированности, а на рис. 3-4 графики вычисленных по экспериментальным данным зависимостей.

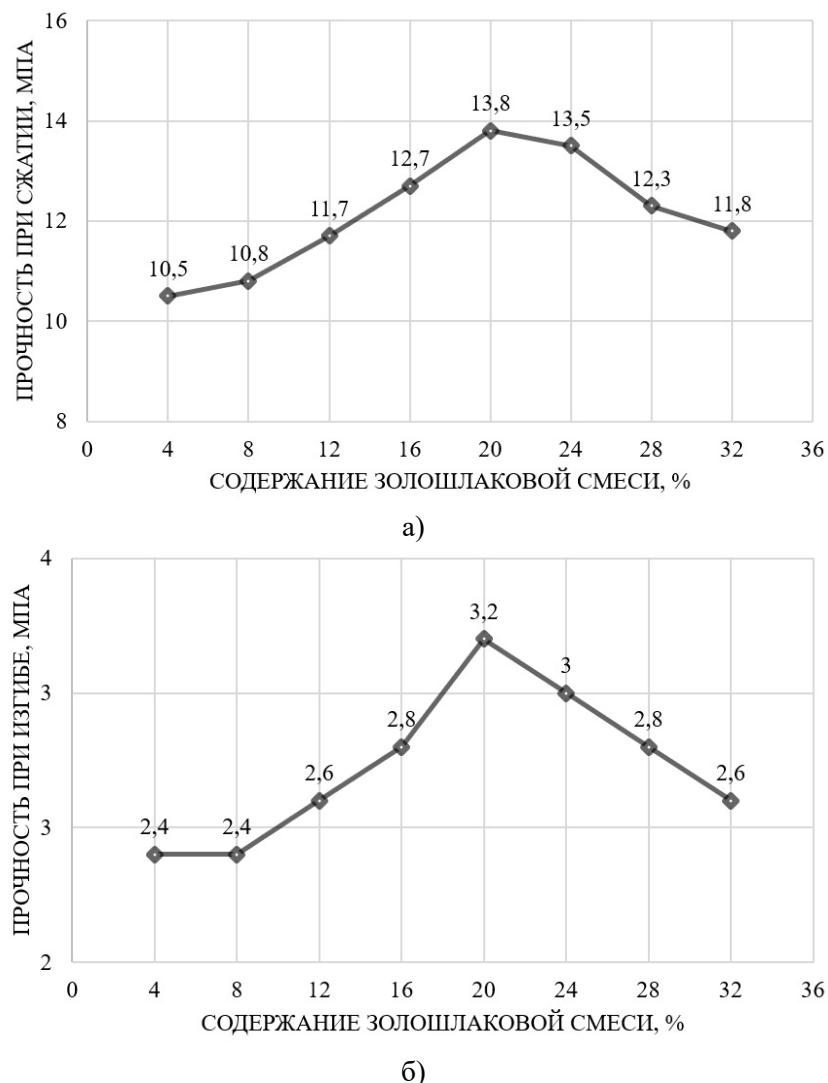


Рис. 3. Зависимость прочности от содержания золошлаковой смеси, МПа: а) – при сжатии; б) – при изгибе (илюстрации авторов)

Fig. 3. Dependence of strength on the content of ash and slag mixture, MPa: a) – during compression; b) – during bending (illustrations by the authors)

Исследование модельных графиков продуктивны, причем как при конкретизации интервалов состояния между исследованиями, так и для предсказывания не вошедших в эксперимент результатов.

Таким образом, наилучшим для генерации керамического кирпича интерпретируется состав №6, включающий 20% золошлаковой смеси. На рис. 5 и 6 продемонстрированы рентгенограммы и ИК-спектры образцов из составов №1 и №6 (оптимальный состав), обожженных при температуре 1050°C (состав №1 взят для сравнения, в который не включен отощитель).

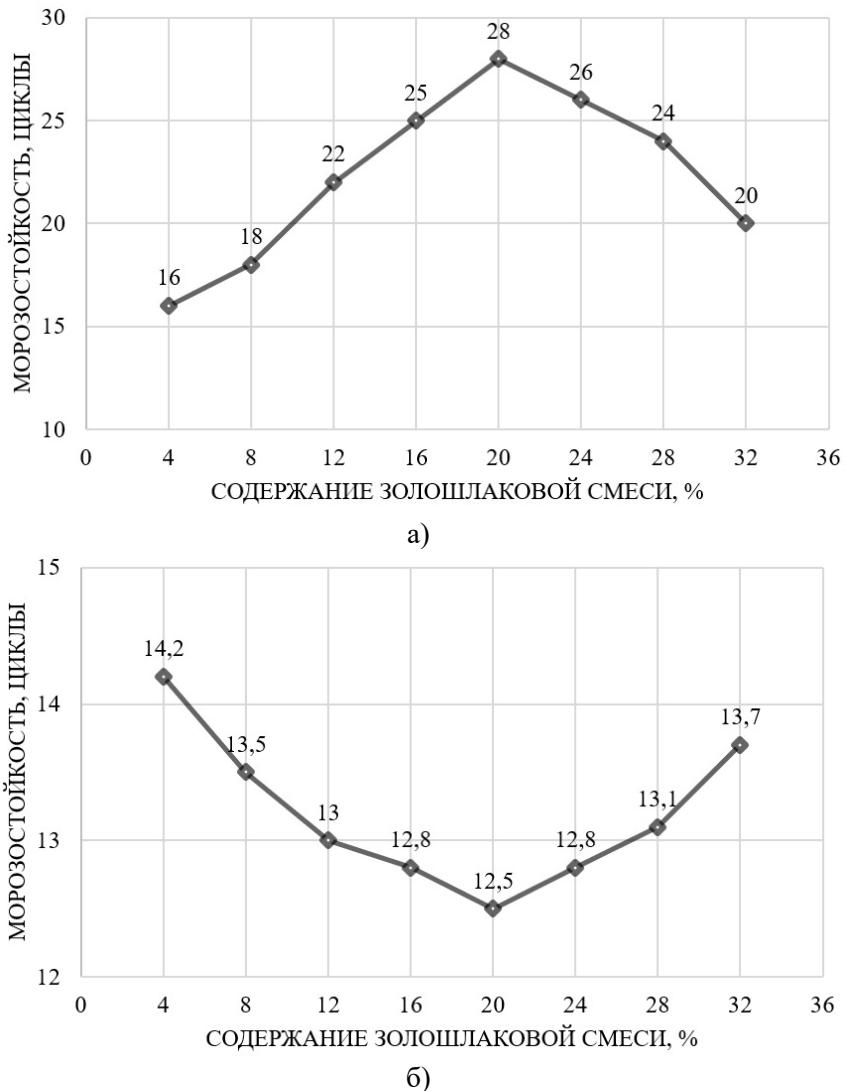


Рис. 4. Зависимость морозостойкости и водопоглощения от содержания золошлаковой смеси: а) – морозостойкость, циклы; б) – водопоглощение, % (илюстрации авторов)

Fig. 4. Dependence of frost resistance and water absorption on the content of ash and slag mixture: a) – frost resistance, cycles; b) – water absorption, % (illustrations by the authors)

Необходимо сделать акцент на то, что вероятные примеси или кристаллы с некачественной окристаллизованностью, идентификация которых не может быть однозначной, на рентгенограммах не приведены.

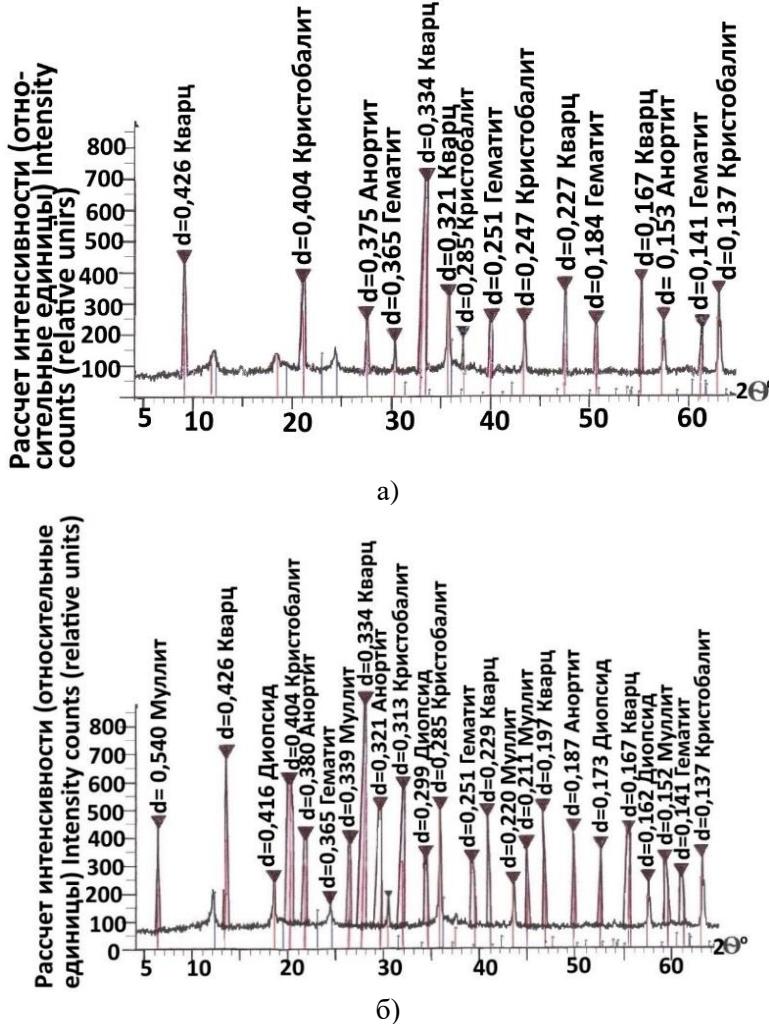


Рис. 5. Рентгенограммы образцов из составов а) №1 и б) №6 (илюстрации авторов)  
Fig. 5. Radiographs of samples from compositions a) №1 and b) №6 (illustrations by the authors)

$\Theta^\circ$  – Угол (Corner), d- межплоскостное расстояние между плоскостями одного семейства параллельных плоскостей

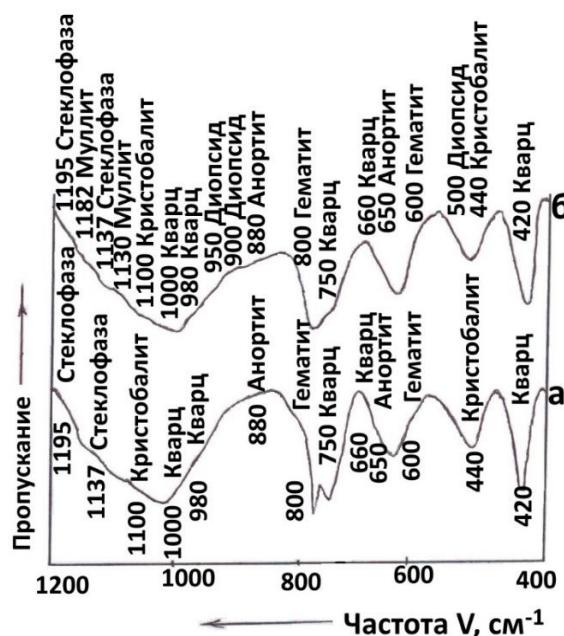


Рис. 6. ИК-спектры образцов из составов: а) №1 и б) №6 (илюстрации авторов)  
Fig. 6. IR spectra of samples from the compositions: a) №1 and b) №6 (illustrations by the authors)

### 3. Результаты и обсуждение

Сведения табл. 6 показывают, что из межсланцевой глины получить керамический кирпич марки М125 без применения золошлаковой смеси практически недостижимо даже при термообработке 1050°C. Табл. 5 и 6 демонстрируют, что с ростом в керамической массе (шихте) содержания золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев до 20% и соответственно снижение межсланцевой глины до 80% технические показатели также повышаются. Последующее повышение золошлаковой смеси и соответственно уменьшение межсланцевой глины эти показатели снижает (табл. 6). Увеличение содержания в керамических массах золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев до 32% снижает число пластичности с 18 до 9 (табл. 5), что способствует при формировании кирпича появлению на образцах трещин (снижается у глинистого компонента связующая способность, которая затрудняет формование изделий). Оптимальными составами для получения кирпича марки М125 являются составы, содержащие 16-24% золошлаковой смеси (табл. 6).

Использование в представленной работе регрессионного метода анализа позволило выбрать уравнение модельного типа для диагностирования рационального состава. Утилизация золошлаковой смеси в количестве 20% в составы керамических масс благоприятствует росту технических показателей кирпича до максимальных. Таким образом, для производства кирпича продуктивным составом является состав, утилизирующий 20% золошлаковой смеси.

При термообработке кирпича из состава №1 рентгенограмма показала формирование новых кристаллических фаз (минералов): гематита, анонита и кристобалита (рис. 5, а), что констатируют ИК-спектры (рис. 6, а). Необходимо отметить, что на рентгенограммах заметить стеклофазу весьма сомнительно, но ИК-спектры наличие жидкой фазы (стеклофазы) в образцах состава №1 подтверждают.

В работах [21, 22] продемонстрировано, что базисом железистых фаз (минералов) интенсифицирует гематит, благоприятствующий возникновению в диапазоне термообработки 1000-1100°C железистого стекла, которое содействует формированию муллита в диапазоне обжига (1100-1200°C).

В.Ф. Павловым в работах [21-22] было продемонстрировано, что в следствии термообработке кирпича кристаллизуется из  $\text{SiO}_2$  кристобалит взамен более устойчивой конфигурации - тридимита. Такую кристаллизацию В.Ф. Павлов констатировал тем, что для кристаллизации минерала с максимальной самостоятельной энергией в фазу с со средней функцией энергии необходимо ощутимо меньшая энергия активации, чем для трансформации в максимально стабильную фазу. Кристобалит не оказывает содействие росту прочности керамики, но увеличивает по оценке В.Ф. Павлова количество дефектов в кристаллической решетке, которые реализуют ускорение твердофазовых реакций [16, 19-22].

Анонит ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) полевой кальциевый шпат способный присутствовать в керамических материалах исключительно в стабильном виде [12]. Работы [12, 19-21] продемонстрировали, что в керамических изделиях для роста прочности конструктивное значение оказывает анонит. Задействование в керамической массе золошлаковой смеси в количестве 20% благоприятствует кристаллизации диопсида и муллита (рис. 5, б), содержание которого в композиции (шихте) уже находилось в количестве 8% (рис. 2, б). Возникновение муллита ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) при температуре обжига 1050°C удостоверяется и показаниями ИК-спектром (рис. 6, б). При обжиге керамических материалов именно кристаллизация муллита передает желаемую прочность изделиям [12, 19-21].

Диопсид ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ), как отмечено в работе [23], способствует получению высокопрочного кирпича на основе легкоплавкой глины. Причем при образовании диопсида повышение прочности происходит при температурах 950-1050°C [16].

### Заключение

1. Проведенный анализ выявил, что керамический кирпич М125 только из межсланцевой глины без отощителей даже при термообработке 1050°C формализовать исключено. Из подобного кирпича возводить знание выше 5-го этажа неоправданно рискованно (материал не сейсмостойкий).

2. В настоящей работе использовался регрессионный метод анализа, позволяющий выбрать необходимые модельные уравнения, которые помогут определить керамические массы для получения керамического кирпича, обладающего эффективными показателями и для предсказания показателей, не отразившихся в эксперименте.

3. Диагностировано, что с ростом в керамической массе количества золошлаковой смеси до 20% и идентично с одновременным снижением межсланцевой глины до 80% технические показатели кирпича растут. Дальнейшее повышение золошлаковой смеси и соответственно уменьшение межсланцевой глины эти показатели кирпича снижаются.

4. Рентгенограммы обожженного кирпича из межсланцевой глины без применения отощителя показали образование следующих кристаллических новообразований: кристобалита, гематита и анортита. Образование новых минералов в образцах из межсланцевой глины подтверждают ИК-спектры, которые показали и наличие при 1050°C стеклофазы, которую, как правило, на рентгенограммах обнаружить затруднительно.

5. Установлено, что введение золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев в керамическую массу 20% способствует образованию муллита и диопсида, которые повышают прочность кирпича.

6. Выявлено, что использование крупнотоннажных отходов ТЭК в производстве массового спроса керамических материалов строительного направления без использования естественного (натурального) сырья способствует: а) рециклирование техногенного сырья; б) оберегание окружающей среды; в) интенсификация с заметным ростом сырьевой базы для получения керамического кирпича.

#### **Список литературы / References**

1. Петропавловская В.Б., Завадъко М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянин А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79> [Petropavlovskaya V.B., Zavadko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Prospects for the use of recycled fuel ash and slag waste from hydraulic removal in dry building mixes. Part 1 // Building materials. 2023. No. 4. P. 73-79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>]
2. Rakhimov, R. Z., Rakhimova, N. R., Gaifullin, A. R. "Influence of the addition of dispersed fine polymineral calcined clays on the properties of Portland cement paste". // Advances in Cement Research, 29(1), P. 21–32, 2017. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00060>
3. Земсков В.В., Прасолов В.И. Истощение минеральных ресурсов как угроза экономической безопасности России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Том 11. № 10А. С. 195-205. DOI: 10.34670/AR.2021.76.61.023 [Zemskov V.V., Prasolov V.I. Depletion of mineral resources as a threat to Russia's economic security // Economics: yesterday, today, tomorrow. 2021. Volume 11. No. 10A. P. 195-205. DOI: 10.34670/AR.2021.76.61.023]
4. Bogdanov A., Mavlyuberdinov A., Nurieva E. The use of nanosized additives in the modification of brick loam / A. Bogdanov // 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. 4005. – DOI 10.1051/e3sconf/202127404005. – EDN XRNVX.
5. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // 2019. №4 // Проблемы региональной экологии. 2019. №4. С. 77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077 [Pichugin E.A. Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in economic turnover // 2019. No.4 // Problems of regional ecology. 2019. No.4. P. 77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077]

6. Бушумов С.А., Короткова Т.Г. Экологически безопасный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики. // Тонкие химические технологии. 2023;18(5):446-460 <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-5-446-460> [Bushumov S.A., Korotkova T.G. Environmentally safe sorbent from ash and slag waste of thermal power engineering. // Fine chemical technologies. 2023;18(5):446-460 [https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-5-446-460\]](https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-5-446-460)
7. Vdovin E., Mavliev L, Stroganov V. Interaction of clay soil components with portland cement and complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide // IOP conference series: Materials Science and Engineering, Kazan, April, 29 – May, 15, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012031. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012031. – EDN DOSSMP.
8. Abdrahimov V. Z., Nikitina N. V. Phase Composition of Interstitial Clay and Gas Emissions on Heat Treatment // ISSN 1068-364X, Coke and Chemistry, 2023, Vol. 66, No. 8, P. 431–437. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S1068364X23701028
9. Abdrahimov V. Z. Combustion Kinetics of Organic Components in Firing Porous Aggregates Based on Ash and Shale Clay Samara State Economic University // Coke and Chemistry, 2023, Vol. 66, No. 3, P. 135–143. DOI: 10.52351/00232815\_2023\_03\_47
10. Khuziakhmetova K., Abdrikhanova 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.(<https://elibrary.ru/item.asp?id=46959977>)
11. Galeev R., Abdrikhanova L., Nizamov R. Nanomodified organic-inorganic polymeric binders for polymer building materials // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 276. – P. 223-228. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.276.223. – EDN YBYFXF. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=35754476>)
12. Leimbi-Merike R., Tiina H., Eneli L. Composition and properties of oil shale ash concrete. // Oil shale. 2014. № 2 (34). P. 147–160.
13. Khuziakhmetova K., Abdrikhanova L., Nizamov R., Islamov A. Polyvinyl Chloride Compounds for Construction Industry // Proceedings of STCCE : International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan, April, 21–29, 2022. Vol. 291. – Switzerland: Springer Nature, 2022. – P. 191-200. – DOI 10.1007/978-3-031-14623-7\_16. – EDN JYWBP. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=49765967>)
14. Коршунов А.Д., Салтыкова С.Н., Дмитриев И.М. Оценка возможности использования углезольных остатков горючих сланцев в качестве сорбента. // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Том 14. №1. С. 127-131. DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.1.023. [Korshunov A.D., Saltykova S.N., Dmitriev I.M. Assessment of the possibility of using coal-ash residues of oil shales as a sorbent. // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. 2023. Volume 14. No.1. P. 127-131. DOI: 10.37614/2949-1215.2023.14.1.023.]
15. Назаренко М.Ю., Кондрашева Н.К., Салтыкова С.Н. Эффективность применения горючих сланцев и сланцевольных отходов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2016 Т. 327 № 9. С. 95–103 [Nazarenko M.Yu., Kondrasheva N.K., Saltykova S.N. The effectiveness of the use of oil shale and shale coal waste // News of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2016 vol. 327 No. 9. P. 95-103]
16. Абдрахимов В.З. Процессы в сейсмостойком кирпиче на основе некондиционной глины и алюмощелочного шлама в интервале температур 1000-1100°C // Известия вузов. Строительство. 2023. №2. С. 25-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-25-35. [Abdrakhimov V.Z. Processes in earthquake-resistant bricks based on substandard clay and aluminum-alkali sludge in the temperature range 1000-1100 ° C. // News of universities. Construction. 2023. No.2. P. 25-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-25-35.]

17. Ковков И.В., Абдрахимов В.З. Исследование регрессивным методом анализа влияние шлака от выплавки ферросплава на физико-механические показатели кирпича // Известия вузов. Строительство. 2006. №9. С. 105-110. [Kovkov I.V., Abdrakhimov V.Z. Investigation by the regressive method of analysis of the effect of slag from ferroalloy smelting on the physico-mechanical parameters of bricks // News of universities. Construction. 2006. No. 9. P. 105-110.]
18. Абдрахимова Е.С., Вдовина Е.В., Абдрахимов В.З., Абдрахимов А.В. Исследование регрессивным методом анализа физико-механических показателей кирпича // Известия вузов. Строительство. 2007. №3. С. 40-46. [Abdrakhimova E.S., Vdovina E.V., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimov A.V. Research of physico-mechanical parameters of bricks by a regressive analysis method // News of universities. Construction. 2007. No.3. P. 40-46.]
19. Fomin A., Hafizov E., Vdovin E., Fafanov R. Stone mastic asphalt modified with stabilizing additives of multifunctional action // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 1(117). – P. 11712. – DOI 10.34910/MCE.117.12. – EDN PYNURM. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=50295834>)
20. Vdovin E., Stroganov V. Phase structure of cement pastes with antifreeze agents // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 4(120). – P. 12007. – DOI 10.34910/MCE.120.7. – EDN DEQNOA. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=54128644>)
21. Vdovin E., Bulanov P., Stroganov V., Mavliev L. Physical and Mechanical Characteristics of Modified Soil Cement with Polycarboxylate Superplasticizers // Proceedings of STCCE : International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022 : Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan, April, 21–29, 2022. Vol. 291. – Switzerland: Springer Nature, 2022. – P. 125-133. – DOI 10.1007/978-3-031-14623-7\_10. – EDN DSAMRE. (<https://elibrary.ru/item.asp?id=49765960>)
22. Павлов В.Ф. Особенности превращения кремнезема, содержащегося в глинах. // Тр. ин-та НИИстройкерамики. 1973. Вып. 38. С 3-11. [Pavlov V.F. Peculiarities of the transformation of silica contained in clays. // Works of the construction ceramics research and development institute. 1973. Issue 38. P. 3-11.]
23. Сафонова Т.В., Зыкова Ю.А. Диопсид - эффективная добавка при производстве кирпича. //Вестник ИрГТУ, № 3. Иркутск, 2009. С.174–180. [Safronova T.V., Zyкова Yu.A. Diopsid is an effective additive in the production of bricks. //Bulletin of the IrSTU, No. 3. Irkutsk, 2009. P.174-180.]

#### Информация об авторе

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

#### Information about the author

**Vladimir Z. Abdrakhimov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Samara State University of Economics, Samara, Russian Federation  
E-mail: 3375892@mail.ru



УДК: 539.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.9

EDN: IASXFJ

## Об одном варианте энергетического метода решения задачи устойчивости балок

**Р.А. Каюмов<sup>1</sup>, Л.Р. Хайруллин<sup>1</sup>, Р.Ф. Гилязитдинов<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Задача устойчивости стержня на упругом основании с различными условиями закрепления, в том числе, с различными упругими опорами является актуальной как в машиностроении, так и в строительстве. Целью данной работы является разработка нового метода решения задачи устойчивости стержня, позволяющая улучшить оценку критической нагрузки при использовании энергетического метода. Для достижения этой цели необходимо представить энергетическую формулировку, отличающуюся от тех, которые имеются в литературе. При этом необходимо показать, что она позволяет в некоторых случаях получить решение, которое даёт меньшее значение критической нагрузки, чем другие подходы. Далее необходимо верифицировать предлагаемый подход на примерах, что и продемонстрировано на примере шарнирно опёртой балки переменной толщины. Выявлено, что он дает меньшее значение критической нагрузки по сравнению с тем, к которому приводит решение, использующее подход Тимошенко при вычислении работы сжимающей силы. Это позволяет более точно оценивать устойчивость стержней и колонн.

**Ключевые слова:** устойчивость стержня, энергетический подход, верхняя граница критической нагрузки, упругие опоры, упругое основание

**Для цитирования:** Каюмов Р.А., Хайруллин Л.Р., Гилязитдинов Р.Ф. Об одном варианте энергетического метода решения задачи устойчивости балок // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 105-113, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.9, EDN: IASXFJ

## Another variant of using the energy method for solving the problem of beam stability

**R.A. Kayumov<sup>1</sup>, L.R. Khayrullin<sup>1</sup>, R.F. Gilyazitdinov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

**Abstract** The problem of stability of a rod on an elastic base with various fastening conditions, including with various elastic supports, is relevant both in mechanical engineering and in construction. The purpose of this work is to develop a new method for solving the problem of rod stability, which allows improving the assessment of the critical load from above when using the energy method. To achieve this goal, it is necessary to present an energy formulation that differs from those available in the literature. At the same time, it must be shown that in some cases it allows to obtain a solution that gives a lower critical load value than other approaches. Further, it is necessary to verify the proposed approach using examples, which is demonstrated by the example of a pivotally supported beam of variable thickness. It is revealed that it gives a lower value of the critical load compared to that resulting from a solution using the Tymoshenko approach in calculating the work of the compressive force. This allows a more accurate assessment of the stability of rods and columns.

**Keywords:** stability of the rod, energy approach, upper limit of the critical load, elastic supports, elastic base

**For citation:** Kayumov R.A., Khayrullin L.R., Gilyazetdinov R.F., On one variant of the energy method for solving the problem of beam stability // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 105-113, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.9, EDN: IASXFJ

## 1. Введение

Задачи устойчивости стержня рассматривались многими учеными [1-2], в том числе в различных усложненных постановках (см., в частности, [3-5]). До сих пор задаче о потере устойчивости элементов конструкций посвящается немало работ (см. например, в [6-8]). Некоторые из них решаются в геометрически нелинейной постановке [9-11]. Имеются работы, в которых рассматриваются другие виды нагрузок и упругих тел [12-13]. В частности, задачи, в которых учитываются не стандартные ограничения на перемещения стержня, рассматривались в работах [14-16]. Задачи о потере устойчивости стержней с такого рода ограничениями (например, таковыми могут быть промежуточные упругие опоры, внецентрное нагружение), вытекающие из реальных технических проблем, рассмотрены в [17-19]. Немало работ посвящено задачам и о закритической деформации упругих элементов (см. обзоры, например, в [5,7,8]). Применяются много разных методов [20-22], различные модели материалов (см. обзоры в [23, 24], из которых изготовлены стержни (в частности, предлагаются методы, основанные на «модифицированных» функциях устойчивости Тимошенко, для анализа немалых перемещений и закритической работы стержней с полужесткими соединениями с учетом отклонения от вертикали, с учетом деформаций сдвига, продольных деформаций и упругого закрепления концов стержня).

Энергетический метод был предложен Тимошенко С.П. [1,2]. Однако он приводит к парадоксу, если в качестве энергии деформации использовать сумму работ изгибающих моментов для малых элементов (представленных в виде произведения сжимающей силы на ее плечо), умноженных на изменение угла наклона элемента балки (см. ссылки в [2] на работы Дроздова П.Ф. и Лейтеса С.Д.). В случае консольной балки это записывается в виде [1]:

$$M = P(f - w), \quad \Delta V = \int_0^L \frac{M^2 dz}{2EJ}$$

Здесь  $M$  - изгибающий момент ( $\kappa H \cdot m$ ),  $f$  - прогиб свободного торца ( $m$ ),  $w$  - прогиб на расстоянии  $z$  от заделки ( $m$ ),  $L$  - длина балки ( $m$ ),  $EJ$  - изгибная жесткость ( $\kappa H \cdot m^2$ ),  $\Delta V$  - энергия изгиба ( $\kappa H \cdot m$ ),  $P$  - осевая сжимающая сила ( $\kappa H$ ). Для этого случая выясняется, что при  $P < P_{kp}$  балка, якобы, неустойчива, а при  $P > P_{kp}$  она, напротив, якобы, устойчива. Для того, чтобы исключить такого рода парадоксы, нужно для вычисления энергии деформации изгибающего момента использовать выражения следующего вида [2]:

$$M = EJ \cdot w'', \quad \Delta V = \frac{1}{2} \int_0^L EJ \cdot (w'')^2 \cdot dz$$

Здесь и далее штрихами обозначаются производные по осевой (продольной) координате  $z$ .

Работа внешней силы  $P$  представляется в виде [1-3]:

$$\Delta T = \frac{P}{2} \int_0^L (w')^2 \cdot dz \quad (1)$$

Подход, предложенный Тимошенко С.П. и основанный на законе сохранения энергии для балок, можно сформулировать следующим образом: работа изгибающих моментов  $M$  равна работе внешних сил при любых виртуальных перемещениях. Он позволяет найти критическую силу из условия:

$$\Delta T = \Delta V$$

Как отмечается в [2], это подход даёт завышенные значения для критической нагрузки.

Целью данной работы является разработка нового метода решения задачи устойчивости стержня, позволяющая улучшить оценку критической нагрузки при использовании энергетического метода. При этом приходится решать задачи о том, как можно записать закон сохранения энергии в новой формулировке, показать, что эта формулировка в частных случаях равносильна известной форме, предложенной Тимошенко, записать выражение для критической нагрузки в общем случае, привести примеры применения этой новой формулировки, показать ее преимущество при решении частных задач.

## 2. Материалы и методы

Для описания модели деформирования балки при продольном изгибе используются гипотезы Бернулли, при этом, как и в подходе Эйлера, пренебрегаются малые продольные деформации на уровне центра тяжести сечения по сравнению с изгибными. При получении разрешающих уравнений привлекается закон сохранения энергии. Аппроксимация закона деформирования использует условия непрерывности перемещений и их первых производных (углов наклона кривой, описывающей картину изгиба). При получении выражения для критической нагрузки предлагается использовать закон сохранения энергии, соотношение для которого отличается от известных на сегодня. Показано, что это соотношение совпадает с выражениями, предложенными Тимошенко только в тех случаях, когда сечения стержня могут быть описаны непрерывными функциями от продольной координаты.

## 3. Результаты и обсуждение

Приведем решение задачи устойчивости балки на основе закона сохранения энергии в новой постановке.

Поскольку при использовании энергетического подхода возможны различные формулировки задачи и они дают завышенные значения для критической нагрузки, то имеет смысл провести расчеты в разных постановках, а затем выбрать то решение, которое даёт меньшее значение критической нагрузки.

Ниже рассматривается формулировка энергетического подхода, отличающаяся от тех, которые были упомянуты выше. Продемонстрируем его на примере балки с двумя шарнирными опорами (рис.1). Для исключения неясностей приведём вывод этой формулировки. Рассмотрим малый элемент балки длины  $dz$  (рис.1). Для прогиба  $w(z)$  выберем аппроксимацию функцию, например, в виде:

$$w = w(z) = B \cdot z(z - L_1) = B(z^2 - zL_1)$$

Поскольку при отыскании  $P_{kp}$  амплитуда прогиба не имеет значения, то можно положить, что  $B=1$ , т.е. можно принять, что

$$w = z^2 - z \cdot L_1 \quad (2)$$

Тогда по закону Гука при изгибе в случае малых прогибов имеем соотношение:

$$M = EJw'' = EJ \cdot 2 \quad (3)$$

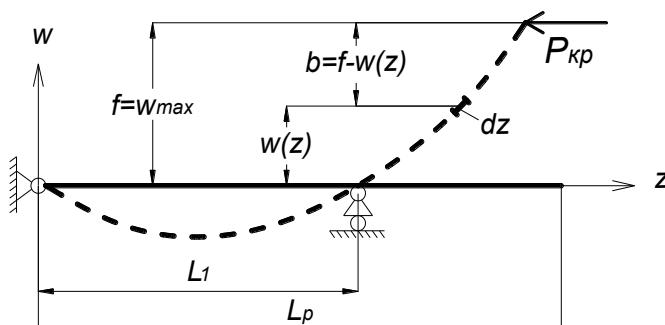


Рис.1 Картина потери устойчивости балки с двумя шарнирными опорами  
(иллюстрация авторов)

Fig.1 Picture of the loss of stability of a beam with two hinged supports  
(illustration by the authors)

Далее будем считать, что виртуальный прогиб задаётся уже после того, как произошел реальный прогиб. Тогда можно не учитывать коэффициент  $\frac{1}{2}$ , который входит в приведенные выше соотношения.

В качестве возможного (виртуального) вида прогиба  $\delta w$  выберем такую же функцию, которая пропорциональна реальному прогибу:

$$\delta w = w = z^2 - zL_1 \quad (4)$$

Работа, производимая изгибающими моментами  $M$ , будет равна:

$$\Delta V = \int_0^{L_p} EJ \cdot (w'')^2 \cdot dz L_p \quad (5)$$

С учетом аппроксимации прогиба (см. формулу (2)) получим:

$$\Delta V = \int_0^{L_p} EJ \cdot 2 \cdot 2 dz = 4EJ \cdot L_p \quad (6)$$

Далее отметим, что  $\Delta T$  (энергию силы  $P$ ) можно вычислять и другим способом, а не так, как приведено в соотношении (1). Согласно рис.1 сила  $P_{kp}$  создает момент с плечом  $b$  в сечении с координатой  $z$ . Тогда:

$$M_{(от P_{kp})} = P_{kp} b = P_{kp} [w_{max} - w(z)] = P_{kp} [w(L_p) - w(z)] \quad (7)$$

Работа от изгиба этим моментом будет:

$$\Delta T_1 = \int_0^{L_p} M_{(от P_{kp})} w'' dz = \int_0^{L_p} P_{kp} [w(L_p) - w(z)] \cdot w'' dz$$

Далее нужно учесть, что сила  $P_{kp}$  при жестком повороте балки около левой точки опоры производит работу:

$$\Delta T_2 = P_{kp} \cdot w'(0) \cdot w(L_p)$$

Окончательно работа  $P_{kp}$  будет:

$$\Delta T = \int_0^{L_p} P_{kp} [w(L_p) - w(z)] \cdot w'' dz + P_{kp} w'(0) \cdot w(L_p) \quad (8)$$

Это соотношение можно получить и другим способом. Для этого нужно использовать формулу интегрирования по частям:

$$\begin{aligned} \Delta T(\delta w) &= P_{kp} \int_0^{L_p} (w')^2 dz = P_{kp} \left( - \int_0^{L_p} w'' w \cdot dz + \int_0^{L_p} (w' w)' \cdot dz \right) = \\ &= P_{kp} \left( - \int_0^{L_p} w'' w \cdot dz + \int_0^{L_p} w'' w(L_p) \cdot dz + w'(0) \cdot w(L_p) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Использование соотношений (8) и (1) дают одинаковые результаты в том случае, когда функция  $w$  непрерывна вплоть до второй производной. Ниже будет приведен пример, когда применение (8) приводит к лучшим результатам по сравнению со случаем использования выражения (1).

Учитывая граничные условия на торцах балки в нашей частной задаче получим зависимость:

$$\Delta T = P_{kp} \int_0^{L_p} [(L_p^2 - L_p \cdot L_1) - (z^2 - z \cdot L_1)] 2 dz = \Delta T = P_{kp} L_p^2 (L_p \frac{4}{3} - L_p) \quad (10)$$

Запишем теперь закон сохранения энергии:

$$\Delta T = \Delta V \quad (11)$$

Подстановка сюда (6) и (9) дает:

$$P_{kp} = 4 \frac{EJ}{L_p \left( L_p \frac{4}{3} - L_1 \right)} \quad (12)$$

Если положить  $L_1 = L_p$ , то получим для  $P_{kp}$  значение, которое превышает величину, найденную по формуле Эйлера, примерно на 20%. Это вызвано тем, что была выбрана слишком простая аппроксимация для  $\mathcal{W}$  в виде (2). Отметим, что при использовании подхода Тимошенко для вычисления  $\Delta T$  по соотношению (1), получим точно такое же выражение для  $P_{kp}$ , что и в (12).

Если же при  $L_1 = L_p$  принять известную функцию для прогиба в виде:

$$w = w_0 \sin \frac{\pi z}{L_1} \quad (13)$$

то найдем точное значение для  $P_{kp}$ .

Энергетический подход удобен в тех случаях, когда многопролетная балка может иметь разную или переменную толщину на разных участках, может быть изготовлена из разных материалов, может иметь множество различных закреплений (см., например, рис.2). Кроме того, кроме стандартных видов закреплений может иметь место упругая опора (например, в точке  $B$ ) и упругое сопротивление повороту сечения (в точке  $D$ ). Законы, которые связывают прогиб в этих точках с упругими характеристиками этих опор, представимы в виде:

$$M_D = c_D w'_D, \quad R_B = c_B w_B \quad (14)$$

Здесь  $c_D$ ,  $c_B$  - жесткости пружин в точках  $D$  и  $B$  соответственно.

Дополнительно можно предположить, что балка находится на упругом основании, закон Винклера для которого имеет вид:

$$q = -k w \quad (15)$$

Здесь  $k$  – коэффициент постели, он может быть разным в разных точках основания, т.е.  $k = k(z)$ .

Рассмотрим далее случай, когда шарнирно опертая балка состоит из трех участков с длинами  $a_1, a_2, a_3$  и моментами инерции  $J_1, J_2, J_3$ . Примем аппроксимацию для  $\mathcal{W}$  на первом и третьем участках в виде (2), т.е.

$$w_1 = z^2 - z \cdot L_p; \quad w_3 = z^2 - z \cdot L_p;$$

На втором участке примем ее в виде

$$w_2 = (c_4)^5 z^5 + (c_4)^4 z^4 + (c_3)^3 z^3 + (c_2)^2 z^2 + c_1 z + c_0$$

Коэффициенты выражаются через  $a_1, a_2, a_3$  из условий непрерывности прогибов, их производных и изгибающих моментов на границах участков. В частном примере при  $J_1 = J_3 = 0.36 J_2$ , приводимом ниже, принимались следующие их значения:

$$L_1 = 0.25 L_p, \quad L_2 = 0.6 L_p, \quad L_3 = 0.15 L_p,$$

$$c_5 \approx 10^{-14} / L_p^3, \quad c_4 = -1.78 / L_p^2, \quad c_3 = 3.91 / L_p, \quad c_2 = -1.91, \quad c_1 = 0.169 L_p, \quad c_0 = -0.08 L_p^2$$

Тогда решение, полученное при использовании соотношения (1), предложенного Тимошенко, будет давать для  $P_{kp}$  значение, которое будет выше, чем в случае, когда используется уравнение (8). А именно, при использовании (8) вытекает, что

$$P_{kp} = 8.63 \frac{EJ_2}{L_p^2} \quad (16)$$

Если же применить подход Тимошенко (т.е. формулу (1)), то получим

$$P_{kp} = 9.02 \frac{EJ_2}{L_p^2} \quad (17)$$

Далее нагрузку, которая приводит к потере устойчивости балки и определяется энергетическим методом, будем обозначать символом  $P_{kin}$ . Ниже также учтено, что при определении  $P_{kin}$  значение амплитуды не имеет значения, т.е. принято, что  $B=1$ , как и в (1).

Отметим, что в большинстве случаев аппроксимацию прогиба легко записать. Например, для случая, изображенного на рис.2, учитывая, что амплитуда не имеет значения, ее можно представить в виде:

$$w = z^2(z - L_1)(z - L_4)^2 \quad (18)$$

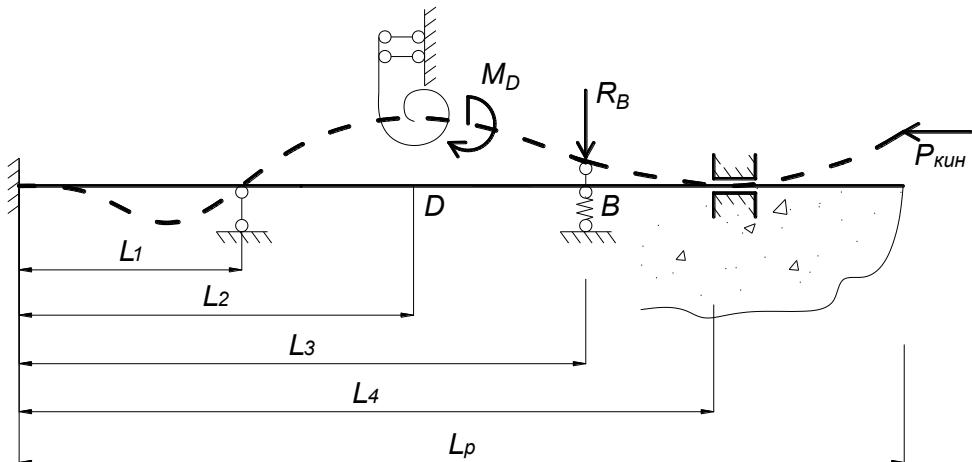


Рис.2 Картина потери устойчивости балки с различными видами опор  
(иллюстрация авторов)

Fig.2 The picture of the loss of stability of a beam with various types of supports  
(illustration by the authors)

Снова в качестве возможного (виртуального) вида прогиба  $\delta w$  можно выбрать аналогичную функцию вида:

$$\delta w = w = z^2(z - L_1)(z - L_4)^2 \quad (19)$$

Тогда из закона сохранения энергии получим следующую формулу для  $P_{kp}$ :

$$P_{kin} = \frac{\int_0^{L_p} EJ \cdot (w'')^2 dz + \int_0^{L_p} k \cdot (w)^2 dz + c_D (w'_D)^2 + c_B (w_B)^2}{\int_0^{L_p} [w(L_p) - w(z)] \cdot w'' dz} \quad (20)$$

Кроме того, в общем случае  $EJ$  и  $k$  могут быть разными на разных участках или сечениях ввиду, например, разных поперечных размеров балки.

Предложенный подход также дает верхнюю границу для критической нагрузки, т.е. формула (20) тоже дает для  $P_{kp}$  завышенные значения по сравнению с ее величиной, определенной бифуркационным методом. Однако преимущество предложенного подхода состоит в том, что он гораздо проще для приближенных расчетов и может быть применен без использования сложного математического аппарата, поскольку даже в более сложных задачах, когда условия закрепления, а значит и  $w$ , и  $\delta w$  имеют более сложный вид, можно интегрирование проводить приближенно, например, численно методом Симпсона. Использование же дифференциальных уравнений нейтрального равновесия требует удовлетворения не только самих этих уравнений, статических и кинематических условий на торцах балки, но также условийстыковок решений на границах участков. Решение систем дифференциальных уравнений как правило вызывает немалые трудности. А энергетический подход сразу дает выражение для  $P_{kp}$  (например, в виде (20) в частном случае, изображенном на рис.2).

При желании уточнить решение можно использовать, как обычно, разложение функции прогиба в ряд по некоторым функциям, удовлетворяющим условиям закрепления. Тогда, записывая (11) при различных виртуальных прогибах, получим однородную систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов этого ряда. Условие существования ненулевого решения этой системы позволяет получить уравнение относительно критической нагрузки и выбрать из его решений её наименьшее значение.

#### 4. Заключение

Предложен энергетический подход к решению различных задач устойчивости упругих стержней (в том числе стержней ступенчатого сечения на упругом основании, с различными условиями закреплениями, с различными упругими опорами), отличающийся от тех, которые имеются в литературе. Он позволяет в ряде случаев получить решение, которое дает меньшее значение критической нагрузки, чем другие энергетические методы. Решение, использующее эту формулировку, продемонстрировано на примере балки с двумя опорами. Выявлено, что оно даёт меньшее значение критической нагрузки по сравнению с тем, к которому приводит решение, использующее подход Тимошенко при вычислении работы сжимающей силы. Предложенный подход (как и другие энергетические формулировки), проще для приближенных расчётов и может быть применён без использования сложного математического аппарата.

#### Список литературы / References

1. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек.- М.: Наука, 1971. - 808 с. [Timoshenko S.P. Stability of rods, plates and shells. - M.: Science, 1971. - 808 p.]
2. Пановко Я.Г. Губанова Н.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы. – М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы. - !979. – 384 с. [Panovko Ya.G. Gubanova N.I. Stability and oscillations of elastic systems: Modern concepts, errors and paradoxes. – M.: Science Main editorial office of the physical and mathematical literature. - !979. – 384 p.]
3. Benmokrane B. Creep-rupture limit for GFRP bars subjected to sustained loads /B. Benmokrane, V.L. Brown, K. Mohamed, A. Nanni, M. Rossini, C. Shield // Journal of composites for construction. 2019. Vol. 23. Issue 6. P. 06019001. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000971
4. D'Antino T. Long-term behavior of GFRP reinforcing bars / T. D'Antino, M.A. Pisani // Composite Structures 2019. Vol. 227. P. 111283. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111283
5. Каюмов Р.А. Закритическое поведение сжатых стержней в упругой среде // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2017. - №5.- С. 122-129. doi: 10.3103/S0025654417050120. [Kayumov R.A. Supercritical behavior of compressed rods in an elastic medium // News RAS. Solids mechanics. - 2017. - No.5.- P. 122-129. doi: 10.3103/S0025654417050120.]
6. Лалин В.В., Розин Л.А., Кушрова Д.А. Вариационная постановка плоской задачи геометрически нелинейного деформирования и устойчивости упругих стержней//Инженерно-строительный журнал. -2013. №1. С. 87-96. [Lalin V.V., Rozin L.A., Kushova D.A. Variational formulation of the planar problem of geometrically nonlinear deformation and stability of elastic rods//Civil Engineering Journal. -2013. No.1. P. 87-96.]
7. 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. [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.]
8. Астапов Н.С., Корнев В.М. Закритическое поведение идеального стержня на упругом основании. //Прикладная механика и техническая физика. 1994. Т.35, №2. С.130-142. [Astapov N.S., Kornev V.M. Supercritical behavior of an ideal rod on an elastic base. //Applied mechanics and technical physics. 1994. Vol. 35, No.2. P.130-142.]
  9. Каюмов Р. А., Тазюков Б. Ф. Устойчивость изогнутой тонкой упругой пластины, нагруженной поперечной силой // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 2001. - № 4. - С. 12-15. [Kayumov R. A., Tazyukov B. F. Stability of a curved thin elastic plate loaded with a transverse force // News of universities. Aviation equipment. - 2001. - No. 4. - P. 12-15.]
  10. Паймушин В.Н. Проблемы геометрической нелинейности и устойчивости в механике тонких оболочек и прямолинейных стержней // Известия РАН. ПММ. - 2007.- Т.71, Вып.5. - С. 855-893. [Paimushin V.N. Problems of geometric nonlinearity and stability in the mechanics of thin shells and rectilinear rods // News of RAS. PMM. - 2007.- Vol.71, Iss.5. - P. 855-893.]
  11. Pi Y.L., Bradford M.A. Non-linear buckling and postbuckling analysis of arches with unequal rotational end restraints under a central concentrated load // International Journal of Solids and Structures. 2012. 26(49). P. 3762-3773.
  12. Sun-ting Yan, Xiao-li Shen, Zhi-jiang Jin. On collapse of non-uniform shallow arch under uniform radial pressure//Engineering Structures, 2018.- 160, 419-438 . doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.027
  13. Bateni, M., Eslami, M.R. Non-linear in-plane stability analysis of FGM circular shallow arches under central concentrated force. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2014. No. 60. P. 58–69. DOI 10.1016/j.ijnonlinmec.2014.01.001
  14. Тарасов В. Н. Об упругой линии сжимаемого продольной силой стержня, расположенного между двумя жесткими стенками // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика.- Выпуск 1 (26). – 2018.- С.29-45. [Tarasov. N. On the elastic line of a rod compressible by longitudinal force, located between two rigid walls // Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer science.- Issue 1 (26). – 2018.- P.29-45.]
  15. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold // Journal of Constructional Steel Research. - 2021. - Vol. 177. doi: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.
  16. Pignataro M., Rizzi N., Luongo A. Stability, bifurcation, and postcritical behaviour of elastic structures. Amsterdam: Elsevier Science, 1991. 358 p.
  17. Carvajal-Munoz J. S., Vega-Posada C. A., Saldarriaga-Molina J. C. Analysis of beamcolumn elements on non-homogeneous soil using the differential transformation method. // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. № 103, P. 67–76. DOI: 10.17533/udea.redin.20210218.
  18. Тарасов В. Н. Об упругой линии сжимаемого продольной силой стержня, расположенного между двумя жесткими стенками // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика.- Выпуск 1 (26). – 2018.- С.29-45. [Tarasov. N. On the elastic line of a rod compressible by longitudinal force, located between two rigid walls // Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer science.- Issue 1 (26). – 2018.- P.29-45.]
  19. Гарипов А. И. Численное исследование закритической работы стержней кольцевого поперечного сечения при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 87-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-87-93. [Garipov A.I. Numerical study of supercritical work of rods of annular cross-section under eccentric compression // Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 5(82). P. 87-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-87-93.]
  20. Peng J. L., Ho C. M., Chan S. L., Chen W. F. Stability study on structural systems assembled by system scaffolds // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 137, P. 135-151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004.

21. Mercier C., Khelil A., Al Mahmoud F., Blin-Lacroix J. L., Pamies A. Experimental investigations of buckling behaviour of steel scaffolds // Structures. 2021. Vol. 33. P. 433-450. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.045.
22. Areiza-Hurtado M., Aristizábal-Ochoa J. D. Second-order analysis of a beam-column on elastic foundation partially restrained axially with initial deflections and semirigid connections // Structures. 2019. Vol. 20. P. 134-146. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2019.03.010.
23. Каюмов Р. А., Тазюков Б. Ф., Мухамедова И. З., Шакирзянов Ф. Р. Большие прогибы вязкоупругих панелей // Известия вузов. Математика. 2019, №11, С. 80-86. [Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z., Shakirzyanov F. R. Large deflections of viscoelastic panels // News of universities. Mathematics. 2019, No. 11, P. 80-86.]
24. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow // Adv. Struct. Mater. 2021. T. 141. C.237-248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2\_18.

### Информация об авторах

**Каюмов Рашит Абдулхакович**, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru), ORCID: 0000-0003-0711-9429

**Хайруллин Ленар Равилевич**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: [lenarhay@mail.ru](mailto:lenarhay@mail.ru), ORCID: 0000-0002-2870-4195

**Гильязитдинов Рамиль Фелисович**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: [gillll@ya.ru](mailto:gillll@ya.ru), ORCID: 0009-0006-2631-3285

### Information about the authors

**Rashit A. Kayumov**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru), ORCID: 0000-0003-0711-9429

**Lenar R. Khayrullin**, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: [lenarhay@mail.ru](mailto:lenarhay@mail.ru), ORCID: 0000-0002-2870-4195

**Ramil F. Gilyazitdinov**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: [gillll@ya.ru](mailto:gillll@ya.ru), ORCID: 0009-0006-2631-3285

УДК: 539.3: 624.04

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.10

EDN: JPGQMS



## Определение перемещений балки с трещиной с использованием теории стержней

М.Н. Серазутдинов<sup>1</sup><sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. В настоящее время актуальность исследования проблем, связанных с возникновением повреждений в балках в виде трещин, обусловлена с необходимостью прогнозировать последствия их возникновения в эксплуатируемых сооружениях. Расчет сложных стержневых конструкций, с использованием только соотношений теории упругости, связан со значительными трудностями. В таких случаях, рациональный метод исследования состоит в сочетании сравнительно простых в реализации методов расчета и теории упругости. Цель работы заключается в выявлении основных закономерностей изменения деформированного состояния в стержневых системах при образовании в них различных дефектов и повреждений. Задачей исследования является разработка математической модели и метода расчета балок при изгибе, позволяющие определять перемещения, возникающие при возникновении трещины.

**Результаты.** Построена математическая модель деформирования балок при изгибе, позволяющая определять перемещения, возникающие при возникновении трещины. Особенность этой модели заключается в том, что часть стержня, содержащая трещину, заменяется участком, на котором размеры поперечного сечения меньше исходной величины. Выявлены достаточно общие закономерности деформирования балок с повреждениями. В частности, показано, что для трещин с одинаковой относительной глубиной, расчетная величина высоты поперечного сечения ослабленного участка получается примерно одинаковой для разных случаев нагружения и закрепления балки.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании методов расчета стержневых конструкций при возникновении трещин в эксплуатируемых сооружениях.

**Ключевые слова:** трещина, изгиб балки, математическая модель, деформированное состояние, закономерности изгиба

**Для цитирования:** Серазутдинов М.Н. Определение перемещений балки с трещиной с использованием теории стержней // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 114-123, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.10, EDN: JPGQMS

## Determination of movements of a beam with a crack using the theory of rods

M.N. Serazutdinov<sup>1</sup><sup>1</sup>Kazan National Research Technological University,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract.** Problem statement. Currently, the relevance of studying the problems associated with the occurrence of damage in beams in the form of cracks is due to the need to predict the consequences of their occurrence in operated structures. The calculation of complex rod structures, using only the relations of the theory of elasticity, is associated with significant difficulties. In such cases, a rational research method consists of a combination of relatively

easy-to-implement calculation methods and elasticity theory. *The purpose of the work* is to identify the main patterns of changes in the deformed state in rod systems during the formation of various defects and damages in them. *The objective of the study* is to develop a mathematical model and a method for calculating beams during bending, which allows determining the movements that occur when a crack appears.

*Results.* A mathematical model of beam deformation during bending is constructed, which allows determining the movements when a crack occurs. The peculiarity of this model is that the part of the rod containing the crack is replaced by a section in which the cross-sectional dimensions are smaller than the initial value. General patterns of deformation of beams with damage have been revealed. In particular, it is shown that for cracks with the same relative depth, the calculated height of the cross-section of the weakened section is approximately the same for different cases of loading and fastening of the beam.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry consists in improving the methods of calculating rod structures when cracks occur in operated structures.

**Keywords:** crack, beam bending, mathematical model, deformed state, bending patterns

**For citation:** Serazutdinov M.N. Determination of movements of a beam with a crack using the theory of rods // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 114-123, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.10, EDN: JPGQMS

## 1. Введение

Последствия возникновения трещин и дефектов, возникающих в деформируемых телах, обычно исследуются с использованием теории упругости или экспериментальными методами. В последние десятилетия для анализа напряженно - деформированного состояния (НДС) конструкций с трещинами также достаточно широко применяются упрощающие расчёт специально разработанные методы, основанные на некоторых гипотезах.

Имеются научные разработки, в которых для определения перемещения и углов поворота балок применяется не классическая теория упругости, а соотношения нелокальной градиентной теории упругости [1-3].

В ряде научных публикаций, в том числе и в [4-6] элементы конструкций с трещинами рассматриваются как совокупность неповрежденных балок, соединенных в месте трещины пружинами, жесткость которых можно определить на основе механики разрушения или молекулярной динамики.

В работе [7] для оценки деформаций в балке с трещиной вводится расчетная жесткость, выбор величины которой основан на анализе перераспределения напряжений.

С учетом этого, что в месте образования трещины, угол наклона поперечного сечения балки имеет разрыв, в статье [8] для анализа НДС пролетных конструкций с трещинами вводилась функция описывающая указанный разрыв.

В [9] изложена модель изгиба балки с надрезом, основанная на соотношениях теории стержней и условий сопряжения частей балки в месте надреза.

В случаях, когда в стержне имеется не один, а несколько дефектов, значительное применение получил подход, использующий для учета трещины дельта-функцию [10-12].

В обзорной статье [13] значительное внимание уделено описанию методов моделирования различных дефектов в стержнях.

Проведение исследований, подобных описанным в [1-12], вызвано необходимостью определять расположение трещин и прогнозировать последствия их возникновения в эксплуатируемых сооружениях. Как показывает анализ научной литературы, для изучения последствий возникших в балках дефектов можно использовать приближенные методы, базирующиеся на анализе интегральных деформационных и (или) частотных характеристик. Такие методы, естественно, не позволяют получить информацию о НДС близи трещины, но их можно применять при определении интегральных характеристик.

Проведение исследований на основе теории упругости, в ряде случаев связано со значительными трудностями. Например, если в одном из элементов сложной статически не определимой стержневой системе возникло повреждение ослабляющее сечение, то это

приведёт к перераспределению НДС во всей системе. Для сложной конструкции определить на основе теории упругости параметры, характеризующие изменение НДС во всей системе трудно решаемая задача. В таких случаях один из возможных способов определения НДС может заключаться в следующем. На первом этапе можно с учетом изменений, возникающих при образовании повреждения, вычислить значения перемещений по сравнительно простой в реализации теории стержней. Затем, на втором этапе, рассчитать по теории упругости НДС стержня с повреждениями, используя в качестве граничных условий вычисленные значения перемещений на концах стержня.

Отметим, что необходимость учёта перераспределения НДС при образовании различных дефектов и повреждений в статически неопределенных системах возникает, например, при расчёте усиления конструкции. Это связано с тем, что анализ эффективности усиления сооружения предполагает оценку НДС системы до и после усиления [14 -16].

Целью настоящей работы является выявление основных закономерностей изменения деформированного состояния в стержневых системах при образовании в них различных дефектов и повреждений в виде трещин. Задача исследования заключается в создании математической модели и метода расчета балок при изгибе, позволяющих определять перемещения, возникающие при возникновении трещины.

## 2. Материалы и методы

Изложим модель деформирования балки с трещиной и метод расчета, которые могут быть использованы для вычисления перемещений. Предлагаемый способ позволяет выявить необходимые закономерности деформирования поврежденного элемента, получить данные о перемещении балки на основе сравнительно простых соотношений теории стержней.

Рассмотрим деформацию изгиба. Полагаем, что трещина образовалась на растянутой стороне балки. Очевидно, что на гранях раскрывшейся трещины напряжения равны нулю, а в некоторой окрестности граней они меньше, чем в исходном неповрежденном состоянии элемента конструкции. Сечение в месте возникновения дефекта ослаблено. Наиболее простой способ смоделировать ослабление сечения, предположить, что в области, прилегающей к граням трещины, поперечные размеры стержня уменьшаются. Исходя из этого, полагаем, что балку с трещиной можно представить в виде стержневого элемента с кусочно-переменным по длине сечением. Основной вопрос, который при этом возникает, это как определить размеры области, в которой сечения стержня уменьшаются.

На рис. 1 $a$ , рис. 1 $b$  показаны фрагменты балки при изгибе, с трещиной в растянутой зоне. Для учета ослабления сечения в месте возникновения трещины, полагаем, что

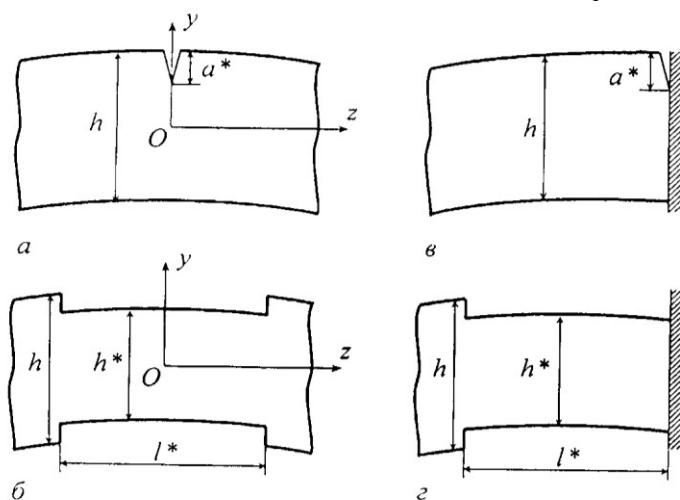


Рис. 1. Фрагмент балки с трещиной (а); модель фрагмента балки с трещиной (б); трещина в заделке (в); модель фрагмента с трещиной в заделке (г) (иллюстрация автора)

Fig. 1. A fragment of a beam with a crack (a); a model of a fragment of a beam with a crack (b); a crack in the seal (c); a model of a fragment with a crack in the seal (d) (illustration by the authors)

вместо трещины, в некоторой ее окрестности, можно ввести участок длиной  $l^*$ , на котором высота поперечного сечения стержня  $h^*$  будет меньше, чем ее исходная величина  $h$  ( $h^* < h$ , рис.1б, рис.1г). Значения  $l^*$ ,  $h^*$  заранее не известны. Их величина зависит от глубины трещины  $a^*$  и от других параметров балки. Используем следующий метод определения  $l^*$  и  $h^*$ . Найдем максимальное значение прогиба балки с трещиной  $v_{TY}$  на основе соотношений теории упругости. Затем, задавая значение  $l^*$  и используя дифференциальное уравнение изгиба балки, подбираем величину  $h^*$  из условия

$$v_{max} = v_{TY}, \quad (1)$$

где  $v_{max}$  – максимальное значение прогиба балки, подсчитанное по теории стержней. Задавая различные значения  $l^*$  и других параметров поперечного сечения и трещины, можно исследовать закономерности деформации балки, применимость и достоинство модели, в которой балку с трещиной представляется в виде стержневого элемента с кусочно-переменным по длине сечением.

В описанном алгоритме расчетов максимальный прогиб балки с трещиной  $v_{TY}$  находится на основе соотношений теории упругости. Поэтому, естественно, что полученные закономерности деформирования изгибаемых балок должны быть такими, чтобы описанную расчетную модель, в виде стержневого элемента с кусочно-переменным по длине сечением, можно было использовать и в случаях отличных от того, который был рассмотрен при расчетах по теории упругости.

Для апробации предлагаемой модели балки с трещиной в виде стержневого элемента с кусочно-переменным по длине сечением, рассмотрим изгиб балок с различными геометрическими характеристиками, условиями закрепления, при действии сосредоточенной и распределенной нагрузки, с трещиной, расположенной в разных местах. Варианты В1, В2, … В5, для которых проводились расчеты представлены в таблице 1.

Полагалось, что поперечное сечение стержня – прямоугольник шириной  $b = 0.1 \text{ м}$  и высотой  $h$ ,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . Расчетные данные получены для шарнирно-опертых по концам (в табл. 1 «Шарнирные опоры») и консольных балок (в табл. 1 «Заделка»), нагруженных, соответственно, распределенной по длине нагрузкой  $q$  и сосредоточенной силой  $F$ , приложенной на свободном конце.

Максимальный прогиб  $v_{TY}$  балки с трещиной вычислялся на основе соотношений плоской задачи теории упругости (коэффициент Пуассона  $\nu=0$ ).

Таблица 1  
Исходные параметры балок

Вариант	Вид закрепления	Координата z трещины	$l, \text{м}$	$F; q$	$h, \text{м}$
B1	Шарнирные опоры	$0.5 l$	4	$q = 10^4 \text{ н/м}$	0.2
B2	Заделка	$l$	3	$F = 10^4 \text{ н}$	
B3	Заделка	$0.5 l$	3	$F = 10^4 \text{ н}$	
B4	Шарнирные опоры	$0.5 l$	4	$q = 10^4 \text{ н/м}$	0.12
B5	Заделка	$l$	4	$F = 10^4 \text{ н}$	

Прогиб  $v(z)$  балки с кусочно-постоянным поперечным сечением находился на основе дифференциального уравнения изгиба балки. На каждом участке с постоянной жесткостью при изгибе используется уравнение

$$\frac{d^2v_i(z)}{dz^2} = -\frac{M_x(z)}{EI_x^i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Здесь  $i$  – номер участка,  $v_i$  - прогиб на участке с номером  $i$ ;  $M_x$  - изгибающий момент;  $EI_x^i$  – жесткость при изгибе.

Решение этого уравнения

$$v_i(z) = -\int \int \frac{M_x(z)}{EI_x^i} dz dz + c_1^i z + c_2^i, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

где  $c_1^i$ ,  $c_2^i$  – константы интегрирования, которые находятся из условий стыковки прогибов и углов поворота в сечениях скачкообразного изменения жесткостей балки, также из граничных условий.

### 3. Результаты расчетов

При проведении расчетов задавались значения длины  $l^*$  участка с высотой поперечного сечения стержня  $h^*$  меньшей, чем высота  $h$  стержня до образования трещины. Затем, используя итерационный процесс из условия (1) с погрешностью менее 1% находилась величина  $h^*$ .

На рис. 2-4 представлены графики, иллюстрирующие зависимость высоты поперечного сечения стержня  $h^*$  от относительной глубины трещины  $\tilde{a} = a^*/h$  и длины  $l^*$  участка, который вводится для моделирования ослабления сечения при возникновении трещины.

Показанные на рис. 2 графики, получены для балок различной длины (табл. 1), у которых трещина расположена в наиболее напряженном сечении ( $M_x = M_x^{max}$ ). Одна из балок шарнирно оперта по концам и нагружена равномерно распределенной нагрузкой, другая – на одном конце заделана и нагружена сосредоточенной силой.

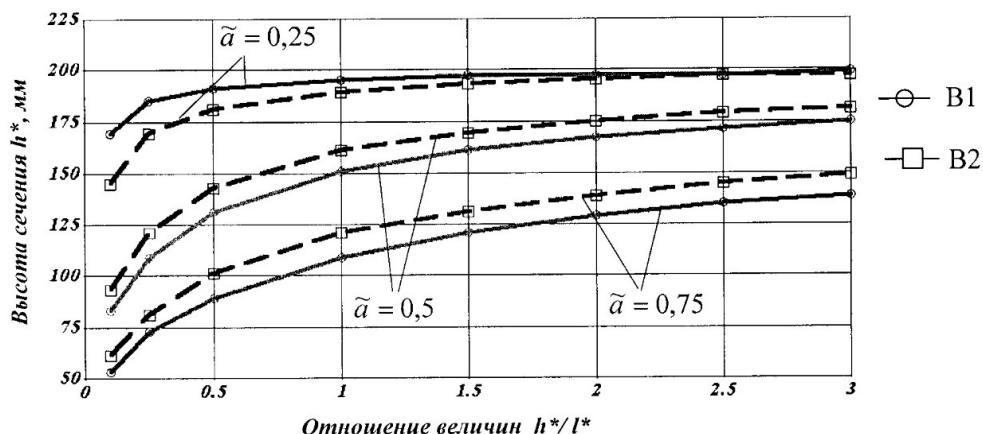


Рис. 2. Графики зависимости  $h^*$  от  $l^*$  для вариантов B1 и B2 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Graphs of the dependence of  $h^*$  on  $l^*$  for variants B1 and B2 (illustration by the authors)

Графики, на рис.3, построены по данным расчетов консольной балки, у которой в одном случае трещина расположена у заделки (вариант В2), а в другом (вариант В3) – по середине длины. Внешняя нагрузка - сосредоточенная сила, приложенная на незакрепленном конце.

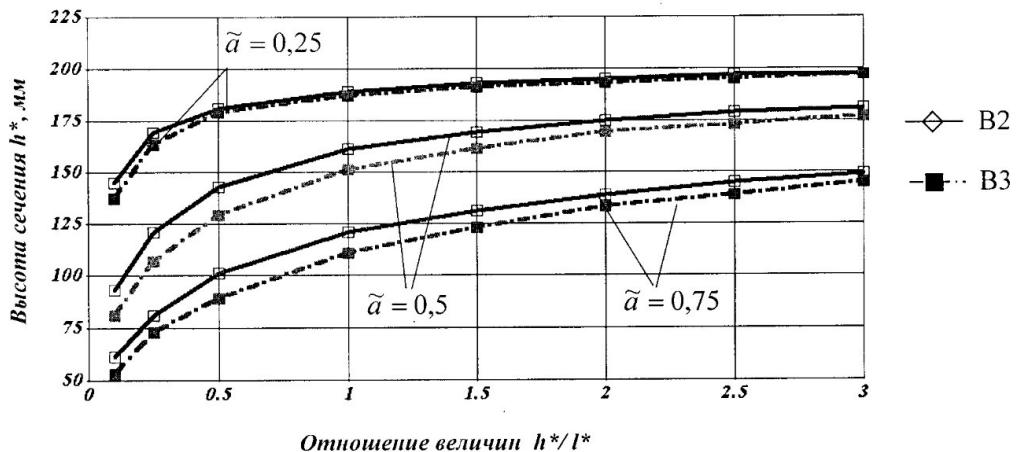


Рис. 3. Графики зависимости  $h^*$  от  $l^*$  для вариантов В2 и В3 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Graphs of the dependence of  $h^*$  on  $l^*$  for variants B2 and B3 (illustration by the authors)

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости  $h^*$  от  $l^*$ , полученные для стержней (табл. 1), у которых одинаковая изгибная жесткость ( $b = 0,1 \text{ м}$ ,  $h = 0,2 \text{ м}$ ).

Графики на рис. 4 иллюстрируют зависимости  $h^*$  от параметров  $\tilde{a} = a^*/h$  и  $l^*$  для балок (варианты В4, В5), у которых величина высоты сечения  $h$  другая (по сравнению с вариантами В1-В3). В вариантах В4, В5 трещина расположена в наиболее напряженном сечении ( $M_x = M_x^{max}$ ). Одна из балок шарнирно оперта по концам и нагружена равномерно распределенной нагрузкой, другая – на одном конце заделана, а на другом – нагружена сосредоточенной силой.

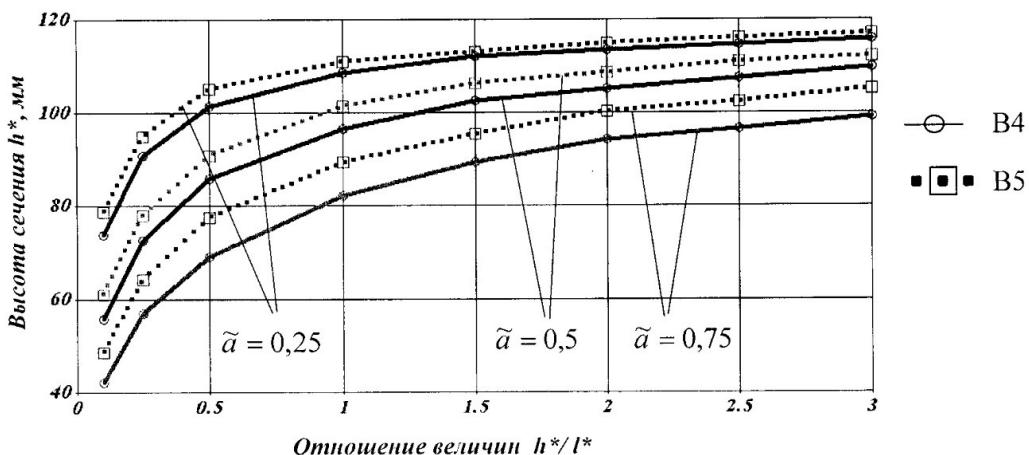


Рис. 4. Графики зависимости  $h^*$  от  $l^*$  для вариантов В4 и В5 (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Graphs of the dependence of  $h^*$  on  $l^*$  for variants B4 and B5 (illustration by the authors)

Как видно из представленных на рис. 2-4 данных, описанный метод моделирования трещины введением участка стержня с меньшим, чем в исходном состоянии, размером сечения, позволяет получить зависимости между различными параметрами и проявить

достаточно общие закономерности. Так, графики на рис. 2 и рис. 3 показывают, что для трещин с одинаковой относительной глубиной ( $\tilde{a} = a^*/h$ ) расчетные величины искомых размеров высоты поперечного сечения ослабленно участка балки  $h^*$  получаются примерно одинаковыми для различных расчетных вариантов.

В таблице 2 представлены относительные значения высоты сечения  $\tilde{h} = h^*/h$ , вычисленные в зависимости от глубины трещины  $a^*/h$  и задаваемой длины  $l^*/h$  участка балки с уменьшенным сечением. Приводятся также величины  $\Delta \tilde{h} \cdot 10^2$ , кратные наибольшей разнице вычисленных в вариантах В1-В3 параметров  $\tilde{h}$  ( $\Delta \tilde{h} = \tilde{h}_{\max} - \tilde{h}_{\min}$ ), а также значения  $\Delta \tilde{h}$  в процентах ( $\Delta = \frac{(\tilde{h}_{\max} - \tilde{h}_{\min})}{\tilde{h}_{\max}} \cdot 100\%$ ).

Таблица 2

Значения параметра  $\tilde{h} = h^*/h$  для вариантов В1-В3

$h = 0,2 \text{ м}$		$\tilde{h} = h^*/h$			$\Delta \tilde{h} \cdot 10^2$	$\Delta, \%$
$a^*/h$	$l^*/h$	B1	B2	B3		
0,25	1	0,975	0,945	0,965	3	3,1
	2	0,985	0,975	0,965	2	2
	3	0,995	0,975	0,975	2	2
0,5	1	0,755	0,805	0,755	5	6,2
	2	0,835	0,875	0,845	4	4,6
	3	0,875	0,905	0,885	3	3,3
0,75	1	0,545	0,605	0,555	6	9,9
	2	0,645	0,695	0,655	5	7,2
	3	0,695	0,745	0,725	5	6,7

Как видно из табл. 1, величины искомых размеров высоты поперечного сечения  $h^*$  ослабленного участка балки, получаются примерно одинаковыми для различных расчетных случаев (табл.1, варианты В1-В3). Исходные данные вариантов В1-В3 существенно отличаются друг от друга, т.к. в них стержни имеют различную длину, по-разному закрепляются, нагружены сосредоточенной или распределенной нагрузкой, имеют трещины, расположенные в разных местах. Из-за различия в указанных параметрах, напряжения, возникающие в балке в месте образования трещины, существенно отличаются по величине. Также, в этих местах напряжений по длине балки изменяются по разным законам (экстремум или не экстремум; линейная или нелинейная зависимость от внешних сил). Тем не менее, при увеличении длины  $l^*$ , найденные значения высоты  $h^*$  поперечного сечения ослабленно участка балки получаются достаточно близкими.

Описанные закономерности получены для  $h = 0,2 \text{ м}$ , т.е. для случаев, когда исходная изгибная жесткость различных стержней одинакова. Как видно из рис. 4, при  $h = 0,12 \text{ м}$  (варианты В4, В5), значения  $h^*$  уже существенно отличаются от значений, полученных при  $h = 0,2 \text{ м}$ . Однако, основные изложенные закономерности, вытекающие из данных табл. 2 сохраняются. Вычисляемые размеры высоты поперечного сечения  $h^*$  ослабленного участка балки получаются близкими для разных расчетных случаев и при  $h = 0,12 \text{ м}$ .

Обратим внимание на любопытный факт «игры цифр», представленных в табл.2. При расчетах параметр  $h^*$  определялся из условия удовлетворения равенству (1) с

точностью до 1%. Затем вычислялись значения  $\tilde{h} = h^*/h$ , которые округлялись до трех значащих цифр и вносились в табл.2. В результате получилось, что во всех 27 значениях  $\tilde{h} = h^*/h$  последняя цифра - 5, и как результат этого, во всех представленных случаях величина параметра  $\Delta \tilde{h} \cdot 10^2$  является целой однозначной цифрой. При расчете стержня с другой жесткостью на изгиб (при  $h = 0,12$  м) указанные особенности в некоторой степени также проявляются. Так, при  $h = 0,12$  м, из 9 рассчитанных значений параметра  $\Delta \tilde{h} \cdot 10^2$ , целой однозначной цифрой оказались 7 из 9.

Сравнение прогибов и углов поворота сечений балки при изгибе, определенных по теории стержней ( $v(z)$  и  $\frac{dv(z)}{dz}$ ) и с использованием соотношений теории упругости ( $v_{TY}(z)$  и  $\varphi_{TY}(z)$ ) показало, что указанные функции получаются практически одинаковыми. Значительное отличие  $\frac{dv(z)}{dz}$  и  $\varphi_{TY}(z)$  возникает только в окрестности трещины, т.к.  $\frac{dv(z)}{dz}$  - непрерывная функция, а  $\varphi_{TY}(z)$  имеет разрыв в месте трещины.

Отметим, что при вычислении  $\varphi_{TY}(z)$  полагалось  $\varphi_{TY}(z) = \frac{u_{TY}^+(z) - u_{TY}^-(z)}{h}$ , где  $u_{TY}^+(z)$  и  $u_{TY}^-(z)$  - продольные перемещения балки при  $y = \frac{h}{2}$  и  $y = -\frac{h}{2}$ .

Очевидно, что изложенный метод моделирования стержня с ослабленным сечением, не может быть использован для анализа НДС в окрестности трещины, т.к. для этого нужно проводить расчёты с использованием теории упругости. Однако, как показано в данной статье, прогибы и углы поворота стержня с трещиной можно рассчитывать с небольшой погрешностью и определять деформированное состояние на основе соотношений теории изгиба балок. При расчете деформированного состояния (прогибы и углы поворота) можно полагать, что трещины нет, а в окрестности сечения, где она возникла, на участке длиной  $l^*$ , толщина стержня  $h^*$  постоянная. Полученная таким образом информация затем может быть использована в качестве граничных условий для расчета напряженного состояния по теории упругости.

Например, если трещина возникает в элементе сложной статически неопределенной системы, то при ее образовании произойдет перераспределение усилий и перемещений. НДС системы с возникшей трещиной будет отличаться от исходного состояния, величины возникающих в ней усилий и перемещений становятся неизвестными. В этом случае, можно рассчитать деформированное состояние системы на основе теории стержней, а затем, если это необходимо, используя полученную информацию о прогибах и углах поворота балки, определить напряженное состояние поврежденного элемента с использованием теории упругости. При этом для анализа напряженного состояния балки с трещиной можно использовать соотношения теории упругости, а в качестве граничных условий – значения прогибов и углов поворота из расчета деформированного состояния по теории стержней.

Важно отметить, что как показывают расчеты, в изложенной модели стержня с трещиной, искомый параметр  $h^*$  получается примерно одинаковым для стержней, у которых одинаковые изгибная жесткость и глубина трещины. Другие параметры – длина, условия закрепления, вид нагрузки, особенности изменения изгибающего момента по длине балки, место расположения трещины могут различаться. Следовательно, если трещина образовалась в балке, которая является элементом сложной стержневой системы, то величину  $h^*$  можно определить, рассматривая только эту балку, задавая для нее нагрузку и граничные условия (виды опор, перемещения и углы поворота на концах),

которые были до возникновения трещины. Отметим, что в данной статье и в работах [1-12] результаты получены с использованием теории стержней. Поэтому их можно широко использовать при анализе интегральных характеристик - перемещений и низших частот собственных колебаний конструкции. Представленные в этой статье исследования в полной мере соответствуют принятым в [1-12] теоретическим основам и согласуются с данными, опубликованным в [1-3].

#### 4. Заключение

Представлены математическая модель и метод расчета балки с трещиной, позволяющие определять возникающие в ней перемещения. Для учета влияния трещины на деформированное состояние, в балке вводится участок, на котором площадью поперечного сечения меньше исходной величины. Изложен метод определения размеров введенного участка балки с уменьшенными размерами поперечного. В результате получается, что при изгибе прогибы и углы поворота стержня можно вычислять с использованием формул сопротивления материалов.

Для апробации предлагаемой модели приводятся результаты расчетов балок с различными геометрическими характеристиками, условиями закрепления, с трещиной, расположенной в разных местах, при действии сосредоточенной и распределенной нагрузок. Изложенный метод учета трещины, позволяет выявить достаточно общие зависимости между параметрами исследуемых объектов. Показано, что для трещин с одинаковой относительной глубиной, расчетная величина высоты поперечного сечения ослабленно участка получается примерно одинаковой для разных случаев нагружения и закрепления балки. Сравнение прогибов и углов поворота балки при изгибе, определенных по теории стержней и с использованием соотношений теории упругости показало, что указанные величины практически совпадают, за исключением малой зоны вблизи трещины. Отмечается, что в случае, когда трещина возникает в балке, которая является элементом сложной статически неопределенной стержневой системы, то изменение деформированного состояния системы можно определить, используя теорию стержней.

#### Список литературы/ References

1. Loya J., Lopez-Puente J., Zaera R., Fernandez-Saez J. Free transverse vibrations of cracked nanobeams using a nonlocal elasticity model // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. 044309. DOI:10.1063/1.3068370. Corpus ID: 121034133.
2. Akbarzadeh Khorshidi M., Shariati M. Buckling and postbuckling of size-dependent cracked microbeams based on a modified couple stress theory // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2017. Vol. 58. № 4. P. 717–724. DOI:10.1134/S0021894417040174.
3. Фу Ч., Ян С. Анализ изгиба балки Тимошенко с трещиной с использованием нелокальной градиентной теории упругости // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 3. с. 196-206 [Fu Ch., Yan S. Analysis of the Timoshenko beam bending with a crack using a non-local gradient theory of elasticity // Applied mechanics and technical physics. 2019. Vol. 60. № 3 P. 196-206]. DOI: 10.15372/PMTF20190320.
4. Xiao Y., Jin H., Yu O. Bending of Timoshenko beam with effect of crack gap based on equivalent spring model // Appl. Math. Mech. 2016. Vol. 37. P. 513–528. DOI:10.1007/S10483-016-2042-9. Corpus ID: 124769412.
5. Batihan A.Ç., Kadioğlu F.S. Vibration Analysis of a Cracked Beam on an Elastic Foundation. International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2016; Vol. 16. № 5: 15500066. (In Eng.) DOI: 10.1142/S0219455415500066.
6. Mazaheri H., Rahami H., Kheyroddin A. Static and Dynamic Analysis of Cracked Concrete Beams Using Experimental Study and Finite Element Analysis. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2018. Vol. 62. № 2. P. 337–345. (In Eng.) DOI: 10.3311/PPci.11450.
7. Fu C., Wang Y. и Tong D. Chunyu F., Yuyang W., Dawei T. Stiffness Estimation of Cracked Beams Based on Nonlinear Stress Distributions Near the Crack //

- Mathematical Problems in Engineering. 2018: 5987973. (In Eng.) DOI: 10.1155/2018/5987973.
8. Локтев А.А., Баракат А. Анализ поведения пролетных конструкций с трещинами при вибрациях // Интернет-журнал «Транспортные сооружения» [Loktev A.A., Barakat A. Analysis of the behavior of span structures with cracks during vibrations // Online magazine "Transport structures" Vol. 9. №3. 2022. / Russian Journal of Transport Engineering https: t-s.today 2022. Vol. 9. DOI: 10.15862/04SATS322.]
  9. Ахтямов А.М., Ильгамов М.А. Модель изгиба балки с надрезом: прямая и обратная задачи // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 1. С. 152-162. [Akhtyamov A.M., Ilgamov M.A. The model of bending a beam with an incision: direct and inverse problems // Applied mechanics and technical physics. 2013. Vol. 54. № 1. P. 152-162. / J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2014. Vol. 54. № 1. P. 132–141.] DOI: 10.1134/S0021894413010161.
  10. Shifrin E.I. Inverse spectral problem for a rod with multiple cracks // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 56–57. P. 181-196. DOI:10.1016/j.ymssp.2014.11.004.
  11. Shifrin E.I. Inverse spectral problem for a non-uniform rod with multiple cracks // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 96. P. 348-365. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.04.029.
  12. Ильгамов М.А. Продольные колебания стержня с зарождающимися поперечными трещинами // МТТ. 2017. № 1. С. 23-31. [Ilgamov M.A. Longitudinal vibrations of a rod with incipient transverse cracks // MTT. 2017. № 1. P. 23-31.] URL: <https://rucont.ru/efd/592439>.
  13. Ахтямов А. М., Ильгамов М. А. Обзор исследований по идентификации локальных дефектов стержней // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 2. С. 3-15. [Akhtyamov A.M., Ilgamov M. A. Review of studies on the identification of local defects of rods // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2020. № 2. P. 3-15]. DOI: 10.31857/S0235711920020042.
  14. Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 27. № 1. С. 98-105. [Serazutdinov M.N., Ubaidulloev M.N. Reinforcement of loaded core structures taking into account the influence of repair and installation forces // Civil Engineering magazine. 2012. Vol. 27. № 1. P. 98-105.]
  15. M.N. Serazutdinov, M.N. Ubaydulloyev. The method of calculating inelastic elements of rod structures under loading, unloading and reloading regimes // 12<sup>th</sup> International Conference "Mesh Methods for Boundary–Value Problems and Applications". Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1158 . Issue 4. P. 1 – 8.
  16. Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Модель и метод расчета усиливаемых стержневых упругопластических конструкций // Материалы XXXIII международной научной конференции. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33. Т. 1. Казань. 2020. С. 103-109. [Serazutdinov M.N., Ubaidulloev M.N. Model and calculation method of reinforced rod elastic-plastic structures // Materials of XXXIII international scientific conference. Mathematical methods in engineering and technology – MMTT-33. Vol. 1. Kazan. 2020. P. 103-109.]

### Информация об авторах

**Серазутдинов Мурат Нуриевич**, доктор физ. мат. наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [serazmn@mail.ru](mailto:serazmn@mail.ru), ORCID: 0000-0001-7222-1935

### Information about the authors

**Murat N. Serazutdinov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation  
Email: [serazmn@mail.ru](mailto:serazmn@mail.ru), ORCID: 0000-0001-7222-1935



УДК: 69.024.81

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.11

EDN:KUZPTA

## Узлы сопряжения железобетонных колонн с фундаментами

**Илшат.Т. Мирсаяпов<sup>1</sup>, Р.Г. Гайнэтдинов<sup>1</sup>, И.Р. Салимзянов<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Главной проблемой при производстве сборных железобетонных колонн является устройство опорной части, как с точки зрения упрощения изготовления, так и обеспечения требуемой несущей способности. Цель работы заключается в разработке узлового соединения сборной железобетонной колонны с монолитным фундаментом при помощи закладной детали. Задачи: рассмотрение существующих узловых соединений сборных железобетонных колонн с монолитными фундаментами и сравнение предложенного соединения с помощью закладной детали по трудоемкости изготовления и монтажа, несущей способности, расходу стали с существующими техническими решениями.

**Результаты.** В работе представлены результаты разработки узлового соединения сборной железобетонной колонны с монолитным фундаментом при помощи закладной детали. В результате выявлено, что узловое соединение с применением закладной детали, предложенное специалистами Казанского государственного архитектурно-строительного университета, не уступает в несущей способности существующим аналогам, при этом упрощает и снижает сроки производства колонн, увеличивает возможность вариативного изменения под различные условия эксплуатации и воспринимаемые усилия.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что за счет применения закладной детали, уменьшаются сроки и стоимость изготовления сборных железобетонных колонн, без ущерба для несущей способности и долговечности.

**Ключевые слова:** сборная колонна, закладная деталь, монтаж колонн, узел сопряжения

**Для цитирования:** Мирсаяпов Илшат.Т., Гайнэтдинов Р.Г., Салимзянов И.Р. Узлы сопряжения железобетонных колонн с фундаментами // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 124-135, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.11, EDN: KUZPTA

## Connections of reinforced concrete columns with foundations

**Ilshat.T. Mirsayapov<sup>1</sup>, R.G. Gainetdinov<sup>1</sup>, I.R. Salimzyanov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The main problem in the production of precast reinforced concrete columns is the design of the supporting part, both from the point of view of simplifying manufacturing and ensuring the required bearing capacity. The purpose of the work is to develop a nodal connection of a precast reinforced concrete column with a monolithic foundation using an embedded part. The main tasks are consideration of existing nodal connections of precast reinforced concrete columns with monolithic foundations and comparison of the proposed connection using embedded parts in terms of the complexity of manufacturing and installation, bearing capacity, consumption of steel with existing technical solutions.

**Results.** The paper presents the results of the development of a nodal connection of a precast reinforced concrete column with a monolithic foundation using an embedded part. As a result, it

was revealed that the nodal connection with the use of embedded parts, proposed by specialists of Kazan State University of Architecture and Engineering, is not inferior in bearing capacity to existing analogues, while simplifying and reducing the production time of columns, increasing the possibility of variable change under different operating conditions and perceived efforts.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that due to the use of embedded parts, the time and cost of manufacturing precast reinforced concrete columns are reduced without compromising bearing capacity and durability.

**Keywords:** prefabricated column, embedded part, installation of columns, connection

**For citation:** Mirsayapov Ilshat T., Gainetdinov R.G., Salimzyanov I.R., Connections of Reinforced Concrete Columns with Foundations // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 124-135, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.11, EDN: KUZPTA

## 1. Введение

В настоящее время одной из приоритетных задач России является сокращение сроков строительства промышленных и гражданских объектов, развитие и повышение эффективности народного хозяйства. Данный процесс возможен при применении быстровозводимых зданий различного назначения – склады, ангары и т.п. Большой популярностью пользуются промышленные здания, вертикальные несущие элементы которого выполняются из железобетона.

Как показывает практика строительства, применение сборных железобетонных колонн совместно с монолитными фундаментами уменьшает сроки строительства, а также упрощает строительно-монтажные работы [1]. Сборные железобетонные колонны, размеры которых определяются расчетом, заранее изготавливаются и поступают на строительную площадку к моменту завершения работ по устройству фундаментов [2]. Центральным вопросом в таких решениях является конструирование узла сопряжения колонны с фундаментом. Такой узел должен соответствовать следующим критериям: быстрота монтажа, снижение расхода стали, снижение трудоемкости при изготовлении колонн, обеспечение достаточной несущей способности [3].

Наиболее распространенными являются узлы сопряжения сборной железобетонной колонны с монолитными фундаментами при помощи анкерной группы [4], которая, как правило, состоит из анкерных болтов, устанавливаемых на этапе устройства фундамента [5-7]. При помощи данных анкерных болтов и закладной детали, установленной в тело колонны, с заранее выполненными отверстиями, происходит монтаж, выверка и надежное закрепление колонны. Таким примером является соединение с использованием системы РЕС (соединение колонн с фундаментами при помощи закладных башмаков) компании Peikko на рис.1 [8-9]. Данное соединение обладает такими преимуществами, как быстрота монтажа колонн, высокая несущая способность, а также унифицированность элементов. Однако недостатком данной системы является усложнение технических процессов на стадии производства сборной железобетонной колонн, и трудоемкость монтажа колонны.

Узловое соединение сборной железобетонной колонны с монолитным фундаментом с использованием системы РЕС состоит из следующих основных конструктивных элементов. Анкерная группа, нижние гайки, закладные башмаки с арматурой, верхние гайки, безусадочный раствор для заполнения пустоты между колонной и фундаментом.

Процесс монтажа на рис.1 с использованием системы РЕС выполняется в следующей последовательности. На этапе устройства монолитного фундамента, закладываются анкерные болты, которые могут быть объединены в общую анкерную группу для сохранения точного размера между их осями на этапе бетонирования. Непосредственно перед монтажом колонны на анкерные болты накручиваются нижние гайки, которые выверяются по высоте для точной установки колонны в проектное положение. Следующим этапом является непосредственно установка колонны, финальная выверка и затяжка верхних гаек. На последнем этапе монтажа происходит заливка базы колонны безусадочным раствором. Несмотря на то, что технологический процесс монтажа колонны является типовым, могут возникать сложности на этапе

затяжки верхних гаек. Так как верхние гайки находятся в углублениях, то угол поворота каждой гайки ограничивается 90 градусами, что приводит к увеличению времени монтажа колонны.

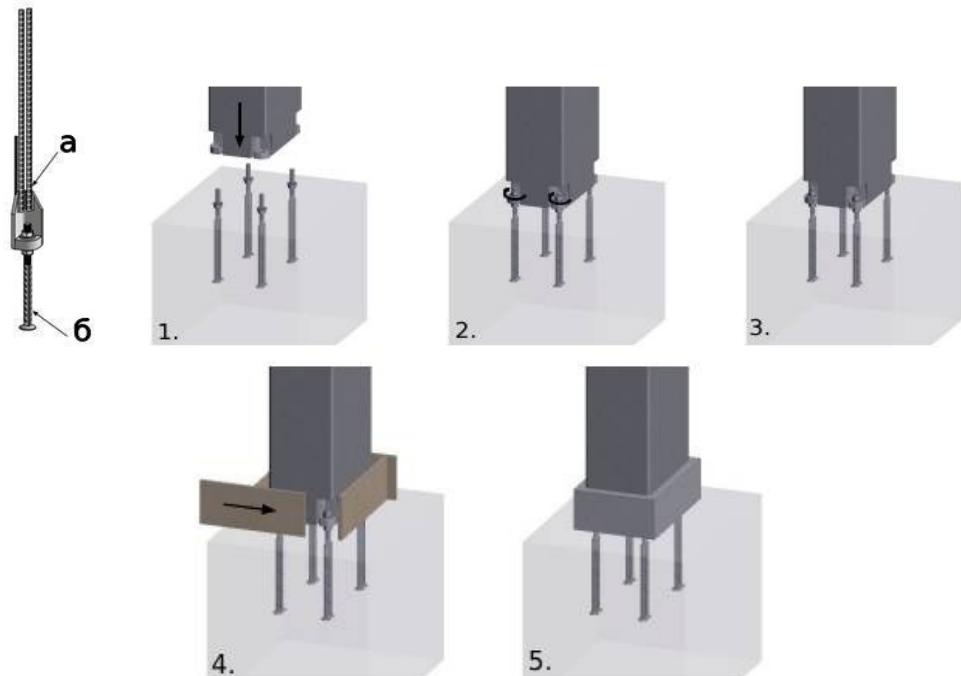


Рис. 1. Узловое соединение РЕС компании Peikko и стадии монтажа колонны с применением системы РЕС [8]: а – башмак колонны; б – анкерный болт; 1 – установка колонны на выверенные гайки; 2 – накручивание верхних гаек; 3 – затяжка верхних гаек; 4 – заливка базы колонны безусадочным раствором; 5 – готовое соединение (иллюстрация авторов)

Fig. 1. The Peikko PEC nodal connection and the installation stages of the column using the PEC system [8]: a – the shoe of the column; b – the anchor bolt; 1 – installing the column on the adjusted nuts; 2 – screwing on the upper nuts; 3 – tightening the upper nuts; 4 – filling the base of the column with a non-shrink mortar; 5 - finished connection (illustration by the authors)

Основные недостатки системы РЕС компании Peikko, проявляются на стадии производства колонны. Последовательность установки системы РЕС, которая предусмотрена производителем. Башмаки РЕС помещаются в армирование колонны и крепятся через пластины основания к стенкам опалубки с помощью пустотообразователей. Установочные допуски башмака в поперечном направлении колонны  $\pm 2$  мм. После бетонирования колонны коробки удаляются с башмаков, и образовавшиеся полости проверяют на отсутствие следов бетона. Пустотообразователи представляют из себя крепежные элементы, применяемые для формирования карманов для анкерных болтов. Для всех типов башмаков колонн имеются отдельные шаблоны, учитывающие так же расположение башмака в сечение колонны. Пустотообразователи позволяют разместить башмаки и прикрепить их к стенке опалубки. Барабашковый винт M16, комплектующийся уплотнительным кольцом, совпадающим по размеру с отверстием под болт в башмаке, служит для закрепления. Уплотнительное кольцо позволяет закрепить башмак в проектном положении на стенке опалубки. Необходимо постоянно проводить защитные мероприятия (например - чистка), для увеличения срока службы. Из выше изложенного следует, что процесс установки башмаков РЕС сопровождается большим количеством дополнительных работ, которые негативно сказываются на времени изготовления колонн. Так же требуются дополнительные комплектующие, такие как: пустотообразователи, вкладыши, ленты на рис.2. При массовом производстве колонн данные комплектующие будут требовать частой замены, что отразится на стоимости колонн.

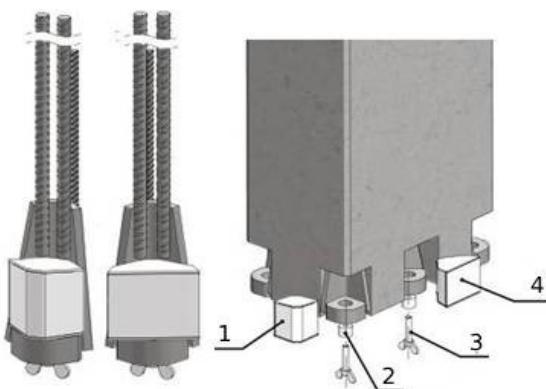


Рис. 2. Монтаж башмаков и специальной опалубки системы РЕС [8]: 1 – угловой короб; 2 – вкладыш; 3 – прижимной винт; 4 – центральный короб (иллюстрация авторов)  
 Fig. 2. Installation of the shoes and special formwork of the PEC system [8]: 1 – corner box; 2 – insert; 3 – clamping screw; 4 – central box (illustration by the authors)

Так же к недостаткам можно отнести то, что данная система подразумевает использование типовых башмаков, под определенные размеры колонн. Соответственно, могут возникать сложности в назначение защитных слоев для рабочей арматуры [10], при использовании колонн в агрессивной окружающей среде или при повышенных требованиях к пожаростойкости колонн.

Целью работы является создание узлового соединения сборной железобетонной колонны с монолитными фундаментами посредством использования закладной детали, а также технико-экономическое сравнение узла с традиционными конструктивными решениями.

Объектом исследования является соединение железобетонной колонны с монолитными фундаментами.

Предмет исследований – узловое соединение сборных железобетонных колонн с монолитными фундаментами при помощи закладной детали, предложенной специалистами Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Задачами исследования являются:

1. рассмотрение основных узловых соединений колонн с фундаментами, выявление преимуществ и недостатков.
2. исследование технико-экономических показателей конструктивных решений узловых соединений на основе расчета типового каркаса.

## 2. Материалы и методы

Специалистами Казанского государственного архитектурно-строительного университета по запросу завода изготовителя сборных железобетонных колонн было разработано узловое соединение сборных колонн с монолитными фундаментами при помощи закладной детали, которое должно сократить сроки производства, трудозатраты и принести положительный экономический эффект, с сохранением несущей способности узла (рис. 3).

Последовательность монтажных работ по установке колонны с применением закладной детали. На стадии производства работ по возведению монолитных фундаментов закладывается анкерная группа, которая состоит из анкерных болтов и объединяющих планок. Планки могут быть выполнены из стальных пластин или из стальных уголков. Данные планки объединяют анкерные болты в одну общую группу, для удобства монтажа и исключения смещения размеров между осями болтов на стадии бетонирования фундамента. Длина, диаметр, форма анкерных болтов подбирается расчетом на стадии проектирования [11]. После того, как бетон фундамента набирает необходимую прочность [12], начинается процесс монтажа колонн с закладными деталями. Изначально устанавливаются нижние выверочные гайки, которые выдерживают проектное положение. Далее происходит установка колонны, которая опирается на выверочные гайки. Производится финальная выверка колонны с привлечением геодезиста.



Рис. 3. Узловое соединение сборных железобетонных колонн с фундаментами с применением закладной детали (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Nodal connection of precast reinforced concrete columns with foundations using embedded parts (illustration by the authors)

После выверки производится установка верхних гаек, которые затягиваются на требуемую величину момента затяжки. Так же для обеспечения большей надежности болтового соединения устанавливаются еще одни контрящие гайки. После производится омоналичивание базы колонны, которое выполняется безусадочным мелкофракционным бетоном. При этом есть возможность предусмотреть омоналичивание базы на большую величину по высоте, для защиты болтового соединения от агрессивных факторов окружающей среды.

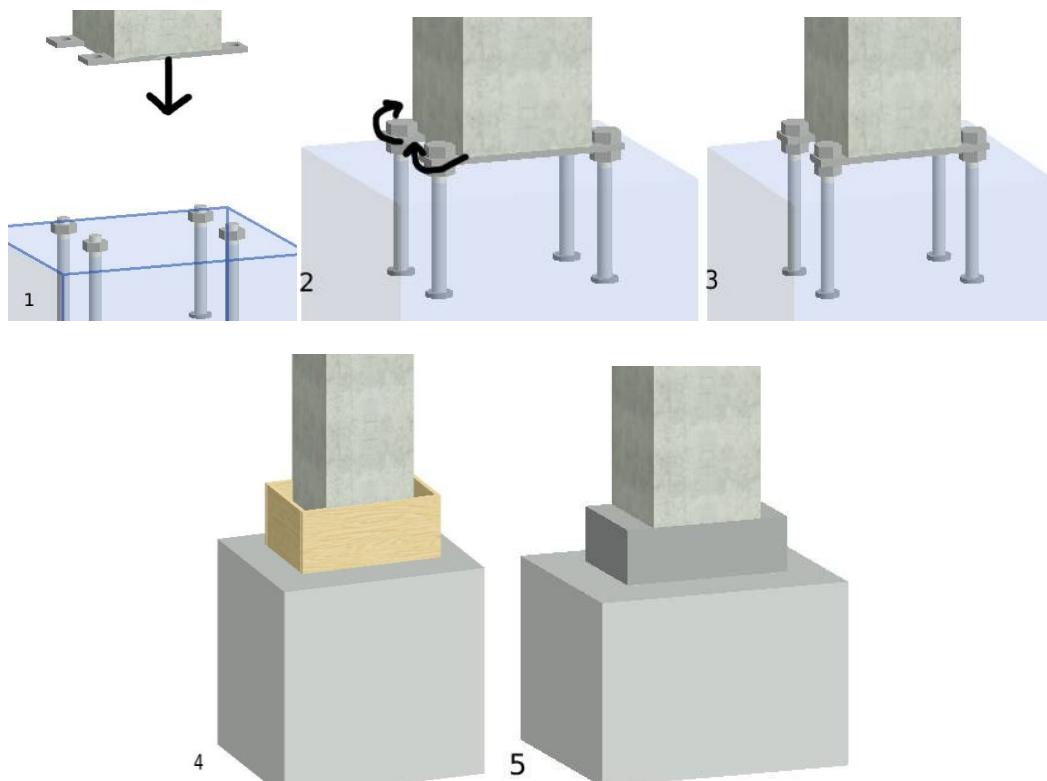


Рис. 4. Стадии монтажа колонны с применением закладной детали разработанной специалистами КГАСУ: 1 – установка колонны на выверенные гайки; 2 – накручивание верхних гаек; 3 – затяжка верхних гаек; 4 – заливка базы колонны безусадочным раствором; 5 – один из вариантов готового соединения (иллюстрация авторов)

Fig. 4. The stages of column installation using the embedded part developed by KSUAE specialists: 1 – installing the column on verified nuts; 2 – screwing on the upper nuts; 3 – tightening the upper nuts; 4 – filling the base of the column with a non-shrink mortar; 5 - one of the options for the finished connection (illustration by the authors)

Процесс производства работ на стадии изготовления колонны на заводе изготовителя. Назначаются требуемые размеры колонны по расчету и диаметр анкерных болтов. Далее производится подбор размеров и сечений закладной детали [13-14].

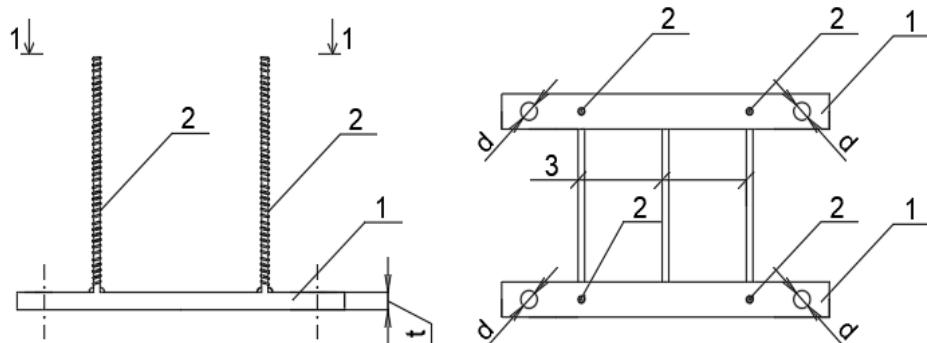


Рис. 5. Закладная деталь: 1 – стальная пластина; 2 – арматурные стержни периодического профиля; 3 – соединяющие арматурные стержни периодического профиля (илюстрация авторов)  
Fig. 5. Embedded part: 1 – steel plate; 2 – reinforcing bars of periodic profile; 3 – connecting reinforcing bars of periodic profile (illustration by the authors)

Первоначально подбирается толщина  $t$  и размеры стальных пластин. С целью уменьшения металлоемкости закладной детали, пластина изготавливается раздельной и соединяется при помощи арматурных стержней периодического профиля 3. В пластинах проделываются отверстия под анкерные болты. Далее производится расчет основных рабочих стержней периодического профиля, которые при помощи сварных соединений прикрепляются к пластинам [15-16]. Расчетом подбирается необходимый диаметр, длина и количество рабочей арматуры [17-18]. Данная закладная деталь запроектирована таким образом, чтобы была возможность вариативного применения под различные комбинации усилий и условий работы.

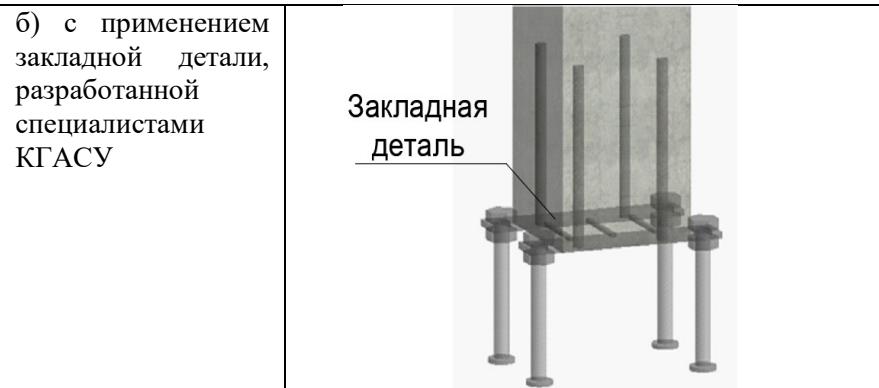
Для технико-экономического сравнения узлов соединения колонн с фундаментами, будут рассмотрены два варианта (табл.1):

- с использованием системы РЕС башмаков компании Peikko.
- с использованием закладной детали, предложенной специалистами КГАСУ.

Таблица 1  
Узловые соединения колонн с фундаментами

Узловые соединения колонн с фундаментами	
a) с применением системы РЕС компании Peikko	

Окончание таблицы 1



Выбор системы РЕС обуславливается тем, что данный вариант соединения колонны с фундаментами является наиболее часто применяемой в современном строительстве.

В качестве объекта исследования использован каркас магазина Леруа Мерлен в г. Ярославль. Конструктивная схема здания включает в себя: монолитные фундаменты, колонны сборные железобетонные сечением 550x550 мм [19]. Для крепления использована система РЕС, компании Peikko. Нагрузки прикладываемые на обрез фундамента:  $N=169,6$  т;  $M_y=8,88$  т·м;  $M_z=27,38$  т·м;  $Q_y=2,841$  т;  $Q_z=0,94$  т. Рабочая арматура колонны Ø 25мм A500C.

### 3. Результаты и обсуждения

В готовом решении несущего каркаса торгового центра были применены башмаки РЕС 36. Башмаки устанавливаются по 4 углам колонны. Масса каждого башмака составляет 30,4 кг. Так же в данном проекте предусмотрено объединение башмаков в общую группу при помощи арматуры периодического профиля Ø 8мм, для обеспечения сохранения проектного положения на стадии производства колонны. Общая длина дополнительных арматурных стержней 1,95 м. Итого полная масса:

$$m_{pec2} = 4 \cdot m_{pec} + m_{s2} l_{s2} = 4 \cdot 30,4 + 0,395 \cdot 1,95 = 122,4 \text{ кг}, \quad (1)$$

где  $m_{pec}$  – масса одного башмака (кг);

$m_{s2}$  – масса одного метра арматуры Ø 8мм (кг);

$l_{s2}$  – длина арматурных стержней Ø 8мм (м).

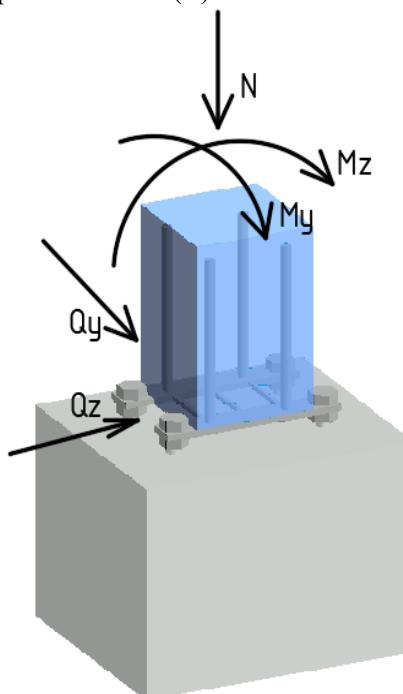


Рис. 6. Расчетная схема (иллюстрация авторов)  
Fig. 6. Calculation scheme (illustration by the authors)

Расчет узла сопряжения с применением закладной детали, разработанной специалистами Казанского государственного архитектурно-строительного университета, производился путем численного моделирования соединения, а именно в программном комплексе «Ansys» [20]. В качестве исходных данных были приняты аналогичные размеры колонны, нагрузки, класс рабочей арматуры и размеры болтов анкерной группы.

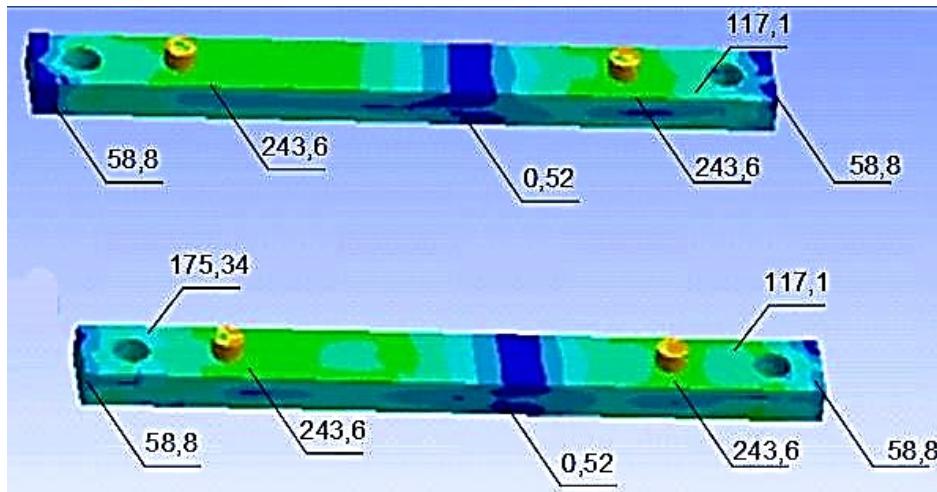


Рис. 7. Напряжения в пластинах закладной детали, МПа (иллюстрация авторов)  
Fig. 7. Stresses in the plates of the embedded part, MPa (illustration by the authors)

По результатам проведенных расчетов итерационным методом, окончательно получены следующие характеристики закладной детали. Сталь пластин закладной детали С255. Размер каждой пластины 80x750x40мм. В качестве соединительной арматуры периодического профиля принятые стержни класса А500С Ø12 мм в количестве 4 шт [21]. Рабочие выпуска арматуры принятые диаметром 32 мм [22].

Расчет требуемой длины анкеровки арматуры:

$$R_{bond} = \eta_2 \eta_1 R_{bt} = 2,5 \cdot 1 \cdot 1,4 = 3,5 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\eta_1$  – коэффициент, учитывающий влияние вида поверхности арматуры;

$\eta_2$  – коэффициент, учитывающий влияние размера диаметра арматуры;

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению (МПа).

Периметр сечения арматуры по номинальному диаметру:

$$u_s = \pi d_s = 3,14 \cdot 32 = 100,48 \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $d_s$  – диаметр анкерной арматуры (мм).

Базовая (основная) длина анкеровки:

$$L_{0,an} = \frac{R_s A_s}{R_{bond} u_s} = \frac{435 \cdot 804,3}{3,5 \cdot 100,48} = 994,9 \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры класса А500С (МПа);

$A_s$  – площадь поперечного сечения анкеруемого стержня ( $\text{мм}^2$ );

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению (МПа);

$u_s$  – периметр сечения арматуры по номинальному диаметру (мм).

Требуемая длина анкеровки:

$$L_{an} = \frac{\alpha L_{0,an} A_s}{A_{s,ef}} = \frac{1 \cdot 994,9 \cdot 804,3}{804,3} = 994,9 \text{ мм}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние на длину анкеровки напряженного состояния бетона и арматуры и конструктивного решения элемента в зоне анкеровки;

$L_{0,an}$  – базовая длина анкеровки (мм);

$A_s$  – требуемая площадь арматуры ( $\text{мм}^2$ );

$A_{s,ef}$  – фактическая площадь арматуры ( $\text{мм}^2$ ).

Проверка конструктивных требований по величине анкеровки:

$L_{an} = 994,9 > 15d_s = 480 \text{ мм}$  – условие выполняется.

$L_{an} = 994,9 > 200 \text{ мм}$  – условие выполняется.

$L_{an} = 994,9 > 0,3L_{0,an} = 298 \text{ мм}$  – условие выполняется.

Конструктивные требования выполняются.

Соответственно, требуемая величина анкеровки арматуры составит: L=995 мм. Длину стержней округлим в большую сторону. Окончательно принимаем L=1000 мм.

Вычислим массу закладной детали:

$$m_{pec} = 4m_s l_s + 2m_p + 4m_{sp} l_{sp} = 4 \cdot 6,31 \cdot 1 + 2 \cdot 18,84 + 4 \cdot 0,888 \cdot 0,39 = 64,3 \text{ кг}, \quad (6)$$

где  $m_s$  – масса одного метра арматуры Ø 32мм (кг);

$l_s$  – длина арматуры Ø 32мм (м);

$m_p$  – масса одной закладной пластины (кг);

$m_{sp}$  – масса одного метра арматуры Ø 12мм (кг);

$l_{sp}$  – длина арматурных стержней Ø 12мм (м).

Определение количества операций при сборке узла на стадии монтажа готового изделия в опалубочную форму.

При использовании системы РЕС: 1 – установка башмаков в проектное положение; 2 – соединение выпусков арматуры башмаков с рабочей арматурой; 3 – установка защитных коробов (пустотообразователей) на все башмаки; 4 – установка проставок на все башмаки; 5 – установка опалубки нижнего торца колонны; 6 – закручивание баращковых винтов для закрепления коробов и опалубки.

При использовании системы с закладной детали, разработанной специалистами КГАСУ: 1 – установка закладной детали в проектное положение (не требуется дополнительная выверка, так как все размеры закладной были приняты с учетом размеров колонны); 2 – соединение выпусков арматуры закладной детали с рабочей арматурой колонны; 3 – монтаж опалубки нижнего торца колонны.

Зачастую при внедрении конструкции в строительство обращают внимание не только на вес конструкции или детали, но и на технологичность, то есть трудоемкость изготовления, сборки, монтажа [23-24]. Ключевую роль играет вид соединений и количество элементов, участвующих в сборке. В табл. 2 приведены основные показатели двух различных видов соединения сборных железобетонных колонн с фундаментами.

Таблица 2  
Технико-экономические показатели узлов сопряжения железобетонных колонн с фундаментами

Узел сопряжения	Вес m, кг	n, количество элементов в узле	k, количество операций при сборке	k <sub>1</sub> , количество операций при монтаже
Узел сопряжения с применением системы РЕС компании Peikko	122,4	4	6	5
Узел сопряжения с применением закладной детали, разработанной специалистами КГАСУ	64,3	3	3	5

#### 4. Заключение

1. Проведенный анализ конструктивных решений узловых соединений сборных железобетонных колонн показал, что на рынке строительных решений существуют часто используемые, безальтернативные, системы соединения колонн с фундаментами. Однако существуют проблемы связанные с производством колонн, в которых применяются такие системы. Эти проблемы связаны с увеличением трудоемкости производства колонн из-за большего количества операций при установке системы, так же происходит удорожание производства, вследствие применения дополнительных элементов опалубочной формы.

2. В результате обзора существующих узловых соединение сборных железобетонных колонн с фундаментами, специалистами КГАСУ было предложено собственное конструктивно-технологическое решение, которое позволило решить следующие задачи: обеспечение требуемой несущей способности соединения; уменьшение количества операций при производстве колонны; вариативность узлового соединения в зависимости от нагрузок и условий эксплуатации.

3. Проведенные исследования показали, что предложенное решение позволяет уменьшить металлоемкость производства, так же уменьшить трудоемкость производства колонны вследствие уменьшения количества операций при монтаже закладной детали в опалубочную форму в 2 раза.

### Список литературы/References

1. Дыховичный Ю.А., Максименко В.А. Сборный железобетонный унифицированный каркас. М. : Стройиздат, 1985. 296с. [Dykhovichny Yu.A., Maksimenko V.A. Prefabricated reinforced concrete unified frame. M. : Stroyizdat, 1985. 296 p].
2. Serbin, S. A., Dedyukhin, P. O., Fomin, N. I. The analysis of technological parameters of precast-monolithic system with permanent formwork walls. 4th International conference on safety problems of civil Engineering critical infrastructures. Safety, 2018.
3. Peng J. L., Ho C. M., Chan S. L., Chen W. F. Stability study on structural systems assembled by system scaffolds // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 137, P. 135–151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004.
4. Люблинский В.А., Миронова Ю.В. Повышение сопротивляемости штепельного стыка колонн прогрессирующему обрушению // Строительство и реконструкция. 2022. №5. С. 57-66. DOI:10.33979/2073-7416-2022-103-5-57-66 [Lyublinskiy V.A., Mironova J.V. Increasing the resistance of the plug joint of columns to progressive collapse // Construction and reconstruction. 2022. №5 P. 57–66. DOI:10.33979/2073-7416-2022-103-5-57-66].
5. Узел соединения железобетонной колонны с фундаментом: пат. 2314392 Рос. Федерация. № 2006121832/03; заявл. 19.06.06; опубл. 10.01.08, Бюл. №1. 7 с. [The connection of the reinforced concrete column with the foundation: patent 2314392 of the Rus. Federation. № 2006121832/03; decl. 19.06.06; publ. 10.01.08. Bull. in №1. 7 p].
6. Узел соединения колонны и фундамента: пат. 163699 Рос. Федерации. № 2015154576/03; заявл. 18.12.15; опубл. 10.08.16, Бюл. №22. 2 с. [The connection of the column and the foundation: patent 163699 of the Rus. Federation. № 2015154576/03; decl. 18.12.15; publ. 10.08.16. Bull. in №22. 2 p].
7. Узелстыка сборной железобетонной колонны с фундаментом: пат. 128636 Рос. Федерации. № 2013100790/03; заявл. 09.01.13; опубл. 27.05.13, Бюл. №15. 2 с. [The connection of the prefabricated reinforced concrete column with the foundation: patent 128636 of the Rus. Federation. № 2013100790/03; decl. 09.01.13; publ. 27.05.13. Bull. in №15. 2 p].
8. Башмаки колонн PEC // Fastcon.ru : сайт. URL: <https://fastcon.ru/products/precast-products/column-connections/t-basmaki-kolonn-pec> (дата обращения: 16.04.2024). [Column shoes PEC // Fastcon.ru : site. URL: <https://fastcon.ru/products/precast-products/column-connections/t-basmaki-kolonn-pec> (reference date: 16.04.2024)].
9. Башмаки колонн HPKM // Peikko.com : сайт. URL: <https://www.peikko.com/> (дата обращения: 16.04.2024). [Column shoes HPKM // Peikko.com : site. URL: <https://www.peikko.com/> (reference date: 16.04.2024)].
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // Appl. Sci. 2020. №5(10). DOI:10.3390/app10051794.
11. Стахов, Д. О. Обзор и сравнение методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном // Молодой ученый. 2021. Вып. 23(365). С. 62- 68. [Stakhov, D. O. Review and comparison of methods for studying the characteristics of adhesion of reinforcement with concrete // Young scientist. 2021. Vol. 23 (365). P. 62-68].

12. Grassl, P., Lundgren, K., Gylltoft, K. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law. International Journal of Solids and Structures. 2002. Vol. 39(20). P. 5205–5223. DOI:10.1016/S0020-7683(02)00408-0.
13. Квасников, А.А. Моделирование совместной работы арматуры различного периодического профиля с тяжелым бетоном: дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Квасников Анатолий Александрович. М., 2019. – 176с [Kvasnikov, A.A. Simulation of the joint operation of reinforcement of various periodic profiles with heavy concrete: dis. cand. tech. sciences: 05.23.01 / Kvasnikov Anatoly Aleksandrovich. M., 2019. – 176 p.].
14. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 21–27. [Tamrazyan A.G. Basic principles of risk assessment in the design of buildings and structures // MGSU Bulletin 2011. No 2–1. P. 21–27].
15. Мирсаяпов Ил.Т. Предел выносливости анкеровки арматуры // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. М.: 2016, №1. С. 37. [Mirsayarov II.T. Endurance limit of reinforcement anchoring // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. M.: 2016, №1. P.37-42].
16. Мирсаяпов Ил.Т. Напряженно-деформированное состояние в заделке арматуры при многократно повторяющихся нагрузках // Вестник МГСУ. М.: 2016, №5. С. 28-36. [Mirsayarov II.T. Stress-strain state in the embedment of reinforcement under repeated loads // MGSU Bulletin.2016, №5. P.28-36].
17. Николюкин А. Н., Ярцев В. П., Бондарев Б. А., Корнеева А. О. Моделирование прочности сцепления арматуры с бетоном на основе искусственной нейронной сети // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 2(54). С. 11-20. DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO [Nikoliukin A. N., Yartsev V. P., Bondarev B. A., Korneeva A. O. Modeling the adhesion strength of reinforcement to concrete based on an artificial neural network // Scientific Journal of Construction and Architecture. 2019. No. 2 (54). P. 11-20. DOI: 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. EDN ISNDAO].
18. Кашеварова, Г. Г. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. С. 62-75. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.04. – EDN WRQTFF [Kashevarova, G. G. Calculation and experimental study of the process of destruction of adhesion bonds when a rigid reinforcement bar is pressed into concrete // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2016. No. 3. P. 62-75. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.04. –EDN WRQTFF]
19. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Монолитный железобетонный каркас при реконструкции зданий // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 5. С. 94 – 98. DOI:10.23968/1999- 5571-2018-15-5-94-97[Pavlov V. V., Horkov E. V. // Bulletin of civil engineers. 2018. No. 5. P. 94 – 98. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-5-94-97]
20. 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]
21. Wang, R.Z., Wang, C.Y., Lin, Y.L. Numerical Model of High Strength Concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 317(1). DOI:10.1088/1757- 899X/317/1/012069.
22. Антаков И. А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой // Жилищное строительство. 2018. № 5. С. 15-18. [Antakov I. A. Features of the work of bent elements with composite polymer reinforcement under load // Housing construction. 2018. No. 5. P. 15-18].

23. Миронова Ю. В. Модернизация конструктивного решения горизонтального стыка плит перекрытия в безригельных каркасах с использованием бесварных петлевидных закладных деталей // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3 (80). С. 55-61 [Mironova Yu. V. Modernization of the design solution of the horizontal joint of the floor slabs in the beam-free frames using seamless loop-shaped embedded parts. Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 3 (80). P. 55-61].
24. Павлов В. В., Хорьков Е. В. Обеспечение прочности стыка «колонна – перекрытие» монолитных железобетонных конструкций при зимнем бетонировании // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1. С. 83 – 88. DOI:10.23968/1999-5571-2018-15-1-83- 87[Pavlov V. V., Horkov E. V. Ensuring the strength of the joint "column – intermediate slab" of monolithic reinforced concrete structures in winter concreting // Bulletin of civil engineers. 2018. No. 1. P. 83 – 88. DOI:10.23968/1999-5571-2018-15-1-83-87]

#### Информация об авторах

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

Email: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru), ORCID: 0000-0003-4902-6167

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

Email: [rishat.gajnetdinov@bk.ru](mailto:rishat.gajnetdinov@bk.ru), ORCID: 0000-0003-3068-3482

**Салимзянов Искандер Радикович**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [iskander706@mail.ru](mailto:iskander706@mail.ru)

#### Information about the authors

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

Email: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru), ORCID: 0000-0003-4902-6167

**Rishat G. Gainetdinov**, candidate of technical sciences, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: [rishat.gajnetdinov@bk.ru](mailto:rishat.gajnetdinov@bk.ru), ORCID: 0000-0003-3068-3482

**Iskander R. Salimzyanov**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: [iskander706@mail.ru](mailto:iskander706@mail.ru)

**УДК:** 694.12**DOI:** 10.48612/NewsKSUAE/68.12**EDN:** MWZFQK

## **Численное моделирование отдельных видов стандартных испытаний соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах**

**Б.Э. Шарынин<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Поволжский государственный технологический университет,  
г. Йошкар-Ола, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Металлические зубчатые пластины широко применяются в строительстве как соединительные элементы для деревянных конструкций. Конструкция пластин с начала 1980-х годов претерпела существенные изменения в части конфигурации зубьев и их размеров, однако производители из Российской Федерации не раскрывают результаты испытаний по новым стандартам. Так как изучение характера работы соединений и конструкций сопряжено с использованием данных о несущей способности металлических зубчатых пластин, одним из способов сокращения дефицита информации в данной области является численное моделирование. Сокращение дефицита информации в данной области является численное моделирование. Цель данного исследования – проведение верификации моделей материалов стали и древесины в составе конечно-элементной модели соединения деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных испытаний металлических зубчатых пластин, выполненных производителями и сторонними исследователями, необходимой для последующего использования в расчётах несущей способности соединений. В рамках исследования решены задачи по разработке расчетных моделей соединений, определению расчетных физико-механических характеристик для модели древесины в качестве ортотропного материала и стали в качестве нелинейного упруго-пластичного материала, также сопоставления результатов численного моделирования с результатами имеющихся данных о несущей способности.

**Результаты.** В результате численного моделирования выявлен удовлетворительный уровень корреляции результатов с данными о натурных испытаниях подобных соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах.

**Выводы.** Сформулированные в исследовании модели материалов стали 08КП и древесины сосны обыкновенной можно рекомендовать для использования для расчётов несущей способности металлических зубчатых пластин с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** численное моделирование, метод конечных элементов, соединения деревянных конструкций, металлические зубчатые пластины, ортотропная модель древесины, стандартные испытания, билинейное упрочнение

**Для цитирования:** Шарынин Б.Э. Численное моделирование отдельных видов стандартных испытаний соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 136-146, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.12, EDN: MWZFQK

# Numerical modeling of some types of standard tests for joints of wooden structures on nail plates

B.E. Sharynin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volga State University of Technology,  
Yoshkar-Ola, Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* Nail plates are widely used in construction as connecting elements for wooden structures. The design of the plates from the 1980s has undergone significant changes in terms of the configuration of the teeth and their dimensions. The test results according to the new standards are not published. Since the study of the nature of the work of joints and structures involves the use of data on the bearing capacity of nail plates, one of the ways to obtain information in this area is numerical modeling. The purpose of this study is to verify models of steel and wood materials as part of a finite element model of wooden structures connected by nail plates through comparing the results of numerical modeling with the results of field tests of metal toothed plates performed by manufacturers and third-party researchers, necessary for subsequent use in calculations of the bearing capacity of joints. As part of the study the following tasks were solved: developing computational models of connections, determining the calculated physical and mechanical characteristics for the model of wood as an orthotropic material and steel as a nonlinear elastic-plastic material, as well as comparing the results of numerical modeling with the results of available data on load-bearing capacity.

**Results.** As a result of numerical modeling, a satisfactory level of correlation of the results with data on field tests of such joints was revealed.

**Conclusions.** The models of materials of 08KP steel and pine wood formulated in the study can be recommended for use in calculations of the bearing capacity of the nail plates using the finite element method.

**Keywords:** numerical modeling; finite element method; connections of wooden structures; nail plates; orthotropic wood model; standard tests; bilinear hardening

**For citation:** Sharynin B.E. Numerical modeling of some types of standard tests for joints of wooden structures on nail plates // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 136-146, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.12, EDN: MWZFKQK

## 1. Введение

Увеличение объемов малоэтажного строительства в Российской Федерации ведет к росту спроса на деревянные конструкции, так как конструкции из дерева обладают необходимой долговечностью, отличаются легкостью обработки при изготовлении, а соотношение прочности и объемного веса древесины позволяет обеспечить необходимую несущую способность при типичных для таких объектов нагрузках. Помимо отделочных материалов и ограждающих конструкций, наиболее широко древесина используется в качестве материала несущих конструкций кровель и перекрытий [1]. Для поддержания высокого уровня качества, соблюдения сжатых сроков строительства объектов и удешевления производства конструкций, всё больше элементов несущих и ограждающих конструкций изготавливается в заводских, а не построенных условиях. При значительных нагрузках, воздействие которых превышает допускаемые напряжения в сечениях из цельной древесины, наиболее целесообразно использовать сквозные решетчатые конструкции – фермы, которые состоят из отдельных элементов, соединенных в узлах. Такой вид конструкций обладает высокой экономической эффективностью [2]. Фермы с соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП) используются и в качестве несущих конструкций перекрытий [3].

Одним из способов соединения элементов ферм в узлах является запрессовка МЗП. Согласно ГОСТ Р 70069 — 2022 «Металлические зубчатые пластины для соединений элементов деревянных конструкций», МЗП – это соединительный элемент в виде

стальной пластины, который получается методом холодной штамповки и имеет с рабочей стороны систему острых металлических зубьев разной формы и длины, составляющих с ней одно целое и отогнутых под прямым углом относительно поверхности пластины.

Инженер из США Джон К. Джурайт 17 марта 1959 года получил патент [4] на МЗП и организовал производство. Начало производства деревянных конструкций с соединениями на МЗП в СССР в 1970-е гг. обострило вопрос разработки собственной методики расчета таких конструкций, а также конструирования МЗП в СССР. Результатом коллективного труда учёных и инженеров того времени, объединенных «ЦНИИСК им. Кучеренко», стали «Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах», утвержденные 23 ноября 1982 года. Документ описывал конструкции двух видов МЗП (МЗП-1,2; МЗП-2), методику расчета конструкций с использованием описанных пластин, указания по изготовлению МЗП и конструкций, защите и эксплуатации. Методика получила своё развитие в «Пособии по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80)», которое уточнило требования к максимальной величине деформаций соединений на металлических пластинах всех типов в 1 мм, а для соединений на нагелях всех типов – в 2 мм. СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» ограничивает деформации соединений на МЗП при полном использовании несущей способности величиной в 1,5 мм.

Основной объем выпускаемых в настоящее время МЗП на территории РФ имеет значительные отличия в конструкции по отношению к МЗП-1,2 и МЗП-2. Действующие в РФ стандарт на МЗП и испытания соединений с их применением ГОСТ Р 57157 — 2016 «Конструкции деревянные. Методы испытаний соединения на металлических зубчатых пластинах.» не содержат сведений о несущей способности. Потребность в этих данных, на фоне отсутствия стандартизованных отчетов в открытых источниках, вынуждает конструкторов и исследователей использовать сведения из отчетов об испытаниях по устаревшим методикам, либо прибегать к источникам и программному обеспечению из США, Канады, Швеции и др., методики расчета несущей способности которых имеют весомые отличия от действующих в РФ. Так. В работах [5, 6] рассмотрены натурные испытания стропильных ферм с соединениями на МЗП производства компании «MITEK». В исследовании [7] проведены испытания узлов фермы, выполненных с использованием МЗП «Техком», однако, сведения об использовании методики испытаний из государственного стандарта отсутствуют.

Использование численного моделирования работы древесины и соединений деревянных конструкций позволяет получать результаты расчета несущей способности конструкций с удовлетворительной точностью. Так, в статье [8] рассмотрена работа опорного узла фермы в рамках численного моделирования и аналитического решения. В результате максимальное расхождение составило около 25%. Коллектив авторов [9] выполнил верификацию упрощенной модели расчета несущей способности деревянно-монолитного перекрытия с несущими балками на МЗП и получил максимальные расхождения до 32,28% между значениями по результатами испытаний и численного моделирования. При исследовании работы CLT-панелей [10] удалось добиться точности моделирования в 6,2% по отношению к данным испытаний. При моделировании плоского прямого изгиба в рамках работы [11], погрешность составила 1%. Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод о возможности численного моделирования работы соединений деревянных конструкций на МЗП с высоким уровнем достоверности в среде САЕ-пакета Ansys.

#### Цель и задачи исследования.

Цель данного исследования – проведение верификации моделей материалов стали и древесины в составе конечно-элементной модели соединения деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных испытаний металлических зубчатых пластин, выполненных производителями и сторонними исследователями, необходимой для последующего использования в расчётах несущей способности соединений.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать расчетные модели соединений на МЗП;

2. Определить расчетные физико-механические характеристики для модели древесины в качестве ортотропного материала и стали в качестве нелинейного упруго-пластичного материала;

3. Сопоставить результаты численного моделирования с результатами имеющихся данных о несущей способности.

Объектом исследований является соединение деревянных элементов с строительных конструкций, выполненное посредством запрессовки МЗП. Предмет исследования – особенности численного моделирования НДС соединений на МЗП на примере образцов для стандартных испытаний.

## 2. Материалы и методы

Для численного моделирования испытаний используется метод конечных элементов, реализованный в САЕ-пакете «ANSYS 2023R1» [12]. Суть метода сводится к пространственной дискретизации твердых тел объемными элементами вида гексаэдров либо тетраэдров, для узлов каждого из которых в трехмерной системе координат XYZ формулируется соотношение (1), из которого следует, что вектор напряжений равен произведению вектора деформаций на матрицу податливости (2). Из полученного соотношения очевидно, что деформации равны частному от деления вектора напряжений на матрицу податливости (2).

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [D]\{\varepsilon^{el}\} \\ \{\sigma\} &= [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T \\ \{\varepsilon\} &= [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T \\ \{\varepsilon^{el}\} &= \{\sigma\}[D]^{-1} \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{xy} & -\nu_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_x} & 1 & -\nu_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & \frac{-\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Где  $\{\sigma\}$  – вектор напряжений при температуре Т, Па;  $\{\varepsilon\}$  – вектор относительных деформаций при температуре Т, ;Т – температура, °С; [D] – матрица податливости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона для соответствующего направления; Е – модуль Юнга для соответствующего направления, Па; G – модуль сдвига для соответствующего направления, Па.

Для формирования конечно-элементных расчетных моделей соединений, исходя из требований стандарта на испытания и имеющихся сведений о несущей способности МЗП были выбраны три вида испытаний и одна конструкция МЗП.

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности заделки соединения на МЗП при растяжении при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины;

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности МЗП при растяжении при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины;

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности МЗП при срезе при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины.

В отличие от более ранних исследований [13, 14], где стояла задача исследования влияния температуры и влажности, а конструкция МЗП была упрощена, для моделирования древесины в качестве ортотропного материала были применены данные о модуле Юнга и коэффициенте Пуассона для продольного (вдоль волокон) и поперечного (поперёк волокон) направлений древесины сосны класса прочности С14, отраженные в таблице В.3 приложения В СП64 «Деревянные конструкции». Сырьем для изготовления МЗП служит прокат стали (08Ю, 08КП, 08 ПС), смотанный в рулоны, ширина которых соответствует, либо кратна ширине изделия. Требования к механическим характеристикам данных марок стали варьируются в широких пределах. В рамках исследования [15], при испытании стали марки 08КП установлено, что предел текучести материала составляет 170 МПа, предел прочности 295 МПа, относительное удлинение 35%.

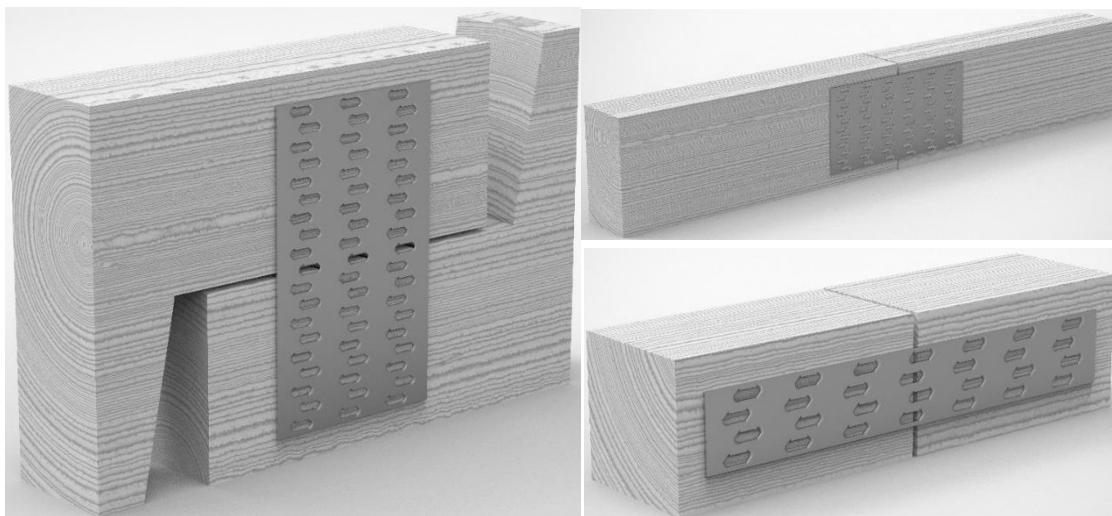


Рис. 1 Моделируемые образцы соединений (слева – срез, справа сверху – растяжение соединения, справа снизу – растяжение МЗП) (иллюстрация автора)

Fig. 1 Simulated samples of joints (on the left – a slice, at the right top – stretching of the joint, at the right bottom – stretching of the plate) (illustration by the author)

Характеристики испытанного материала соответствуют требованиям стандарта на МЗП. Чтобы при численном моделировании обеспечить упруго-пластическое поведение материала, будет использована модель билинейного изотропного упрочнения. С помощью уравнения Рамберга-Осгуда (4) выполним аппроксимацию [16] графика напряжения-деформации из двух прямых.

$$E_t = \frac{E\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2} + 0.002nE\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{0.2}}\right)^{n-1}} = 1948 \text{ МПа} \quad (4)$$

$$n = \frac{\ln 20}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})} = 1,41$$

где  $E_t$  – модуль тангенса угла наклона аппроксимирующей кривой в области за пределом текучести, Па;  $\sigma_{0.2}$  – предел текучести материала, Па;  $\sigma_t$  – предел прочности материала, Па;  $\sigma_{0.01}$  – напряжения при относительной деформации, равной 0,01%, Па;  $n$  – параметр Рамберга-Осгуда.

Используемая модель упруго-пластического материала обладает достаточной точностью при величине относительных деформаций до 10%, это обусловлено постоянным углом наклона кривой напряжения-деформации выше предела текучести.

В соответствии с [3], предельными деформациями соединения при исчерпании несущей способности будем считать величину 1,5 мм. Усилия, при которых возникает данная деформация будем использовать в качестве расчетного для определения несущей способности.

При обработке данных численного моделирования для определения характеристик несущей способности МЗП будем использовать формулы, указанные в ГОСТ Р 57157 — 2016 для соответствующих видов испытаний. Так как согласно ГОСТ 19904 — 90 «Прокат листовой холоднокатаный» предельные отклонения по толщине для сырья при изготовлении МЗП составляют  $\pm 0,11$  мм, а рекомендуемая толщина защитного цинкового покрытия 17 мкм, принимаем расчетную толщину МЗП 0,873 мм. Безразмерный параметр принимаем равным 0, ввиду того, что модель древесины является однородной и обладает постоянной плотностью, отношение плотности элемента в котором произошло разрушение к нормативной плотности древесины, по указанной причине принимаем равным 1, размеры МЗП приведены в таблице 1. Прямое моделирование испытаний соединений на МЗП, а не элементов конструкций, позволит повысить точность сопоставления и более качественно верифицировать модели материалов. Точки для определения деформаций при моделировании определим исходя из рекомендаций стандарта на испытания

Таблица 1

Размерные параметры МЗП

Размеры МЗП, мм	Вид испытания		
	Растяжение МЗП: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	Срез МЗП: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	Растяжение соединения: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$
Длина	172.25	76.25	148.25
Ширина	27	128.25	74.25
Толщина	1	1	1
Зазор	2	2	2

### 3. Результаты и обсуждение

Данные о полученных значениях несущей способности моделируемых соединений приведены в таблице 2, в которой также приведены значения несущей способности аналогичных по конструкции и близких по размерным параметрам МЗП (GNA-20S, MT-20, GP-01) полученные при сертификационных испытаниях в Швеции (Дании) [17], Канаде [18], по данным испытаний в РФ. С индексом 1 приведены данные расчёта для стали с характеристиками, аналогичными сертификационным образцам.

Графики «нагрузка-скольжение», полученные в результате обработки результатов численного моделирования приведены на рисунке 2.

Для определения длительной несущей способности при растяжении соединения, в Европейских странах используются коэффициенты безопасности  $K=1.43$  для несущей способности непосредственно МЗП,  $K=1.64$  для несущей способности соединений деревянных конструкций на МЗП. В РФ используются подходы, изложенные в рекомендациях по испытанию соединений деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко, которые предусматривают соединений на МЗП величины  $K=1.3$  и более, которые вычисляются по формуле (5) в зависимости от продолжительности испытаний  $t$  в секундах. Так, для испытаний [19]  $K=2,52$ .

$$(5) \quad K_n = 1.38(1.94 - 0.11 \log_{10} t)$$

При моделировании растяжения МЗП наиболее нагруженной зоной, в которой достигаются напряжения предела текучести стали, является сечение над зазором между деревянными элементами, которое является наиболее ослабленным. Такая модель поведения образца полностью соответствует требованиям стандарта на испытания. Поученная величина несущей способности, с учетом характеристик моделируемой стали (приведена в таблице в скобках), примерно, на 14% ниже по отношению к результатам испытаний в Швеции и Канаде и на 25% выше значений испытаний, проведенных в РФ.

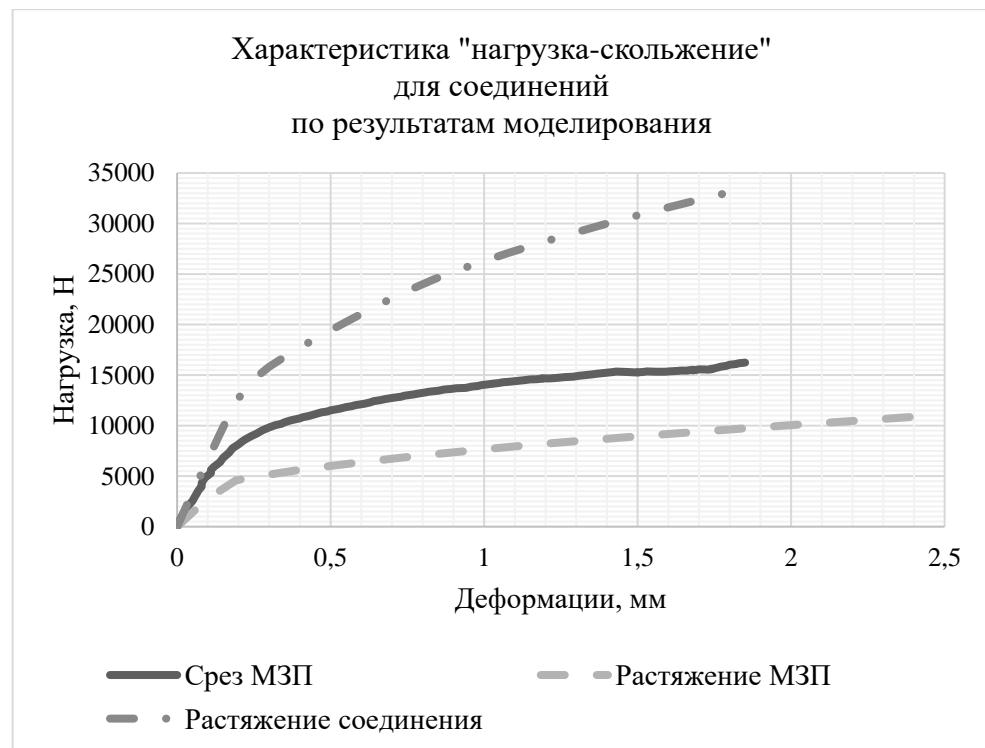


Рис. 2 Диаграмма «нагрузка-скольжение» по результатам моделирования  
(иллюстрация автора)

Fig. 2 "Load-slip" diagram based on the simulation results (illustration by the author)

Численная модель испытаний по определению несущей способности МЗП (Рис. 3) на срез отлично согласуется с данными сертификационных испытаний в Швеции и Канаде, при этом относительно [19] несущая способность в 2,5 раза выше. Что, возможно, свидетельствует о применении ранее указанного коэффициента безопасности  $K=2,52$  при обработке результатов испытаний, однако в источнике механизмы расчета полностью не описаны.

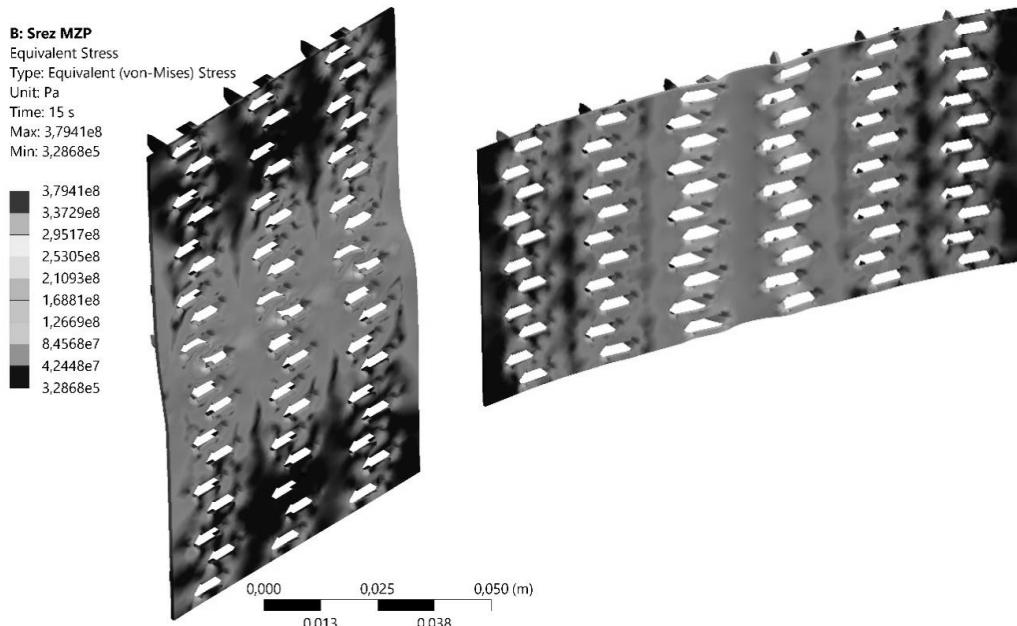


Рис. 3 Напряженно-деформированное состояние МЗП по результатам моделирования (слева - срез, справа – растяжение соединения) (иллюстрация автора)

Fig. 3 The stress-strain state of the nail plate according to the results of modeling (on the left - a slice, on the right – tension of connection) (illustration by the author)

Также отклонения могут быть вызваны особенностями образца для испытаний (использована отличная от моделируемой схема), а также разброс параметров стали и древесины. Основные напряжения сосредоточены на линии среза, от которой они с постепенным снижением величины распространяются в диагональном направлении.

Отличие несущей способности численной модели соединения для испытаний соединения на растяжение в большую сторону от результатов сертификационных испытаний Канады на 22% обусловлено большей толщиной моделируемой МЗП (1 мм против 0,914), а также особенностью подсчета эффективной площади. С применением коэффициента безопасности из испытаний [19], отличие от результатов испытаний составляет 4%. Напряжения присутствуют, практически, по всей площади МЗП с убыванием от места стыка деревянных элементов, как и рекомендует стандарт испытаний. Полученные результаты численного моделирования отличаются высокой точностью и могут быть использованы при конструировании, а также при изучении характера работы соединений на МЗП.

Таблица 2  
Данные о несущей способности МЗП

Вид несущей способности	По результатам моделирования	По данным серт. испытаний (Швеция)	По результатам исследования	По данным серт. испытаний (Канада)	По данным испытаний (РФ)
Толщина МЗП	1	н/д	1	0.914	1
Растяжение МЗП (Н/мм): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	144.564 (243.15) <sup>1</sup>	268	283	174	115
Срез МЗП (Н/мм): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	87.346	89	120	83	35
Растяжение соединения (Н/мм <sup>2</sup> ): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	2.897	1.1872	1.371	2.37	1.2

Следует отметить, что при испытаниях в разной местности используются различные породы древесины, прочностные характеристики которых изменяются в широком диапазоне [20]. Характер деформаций соответствует соединениям деревянных конструкций, выполненных с использованием стальных цилиндрических нагелей [21], кривые деформаций не имеют ярко выраженных скачков. Наличие методики расчета соединений на МЗП позволяет избежать при испытаниях и моделировании незапланированного исчерпания несущей способности, примером которого может служить хрупкое разрушение образца 2 из [22].

#### 4. Заключение

1. Полученные в результате численного моделирования данные коррелируют с результатами экспериментальных исследований.
2. Модель билинейного упрочнения стали в области допустимых деформаций соединений элементов деревянных конструкций на МЗП адекватно описывает поведение материала.

В дальнейшем, для моделирования циклических нагрузений рассматриваемых соединений целесообразно рассмотреть для материала древесины модель с накоплением повреждений, что позволит добиться более точного моделирования деформаций древесины в пластической стадии работы.

### Список литературы / References

1. Котлов В. Г. Металлические зубчатые пластины в пространственных деревянных конструкциях: преимущества и перспективы использования// Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 190 с. [Kotlov V. G. Nail plates in spatial wooden structures: advantages and prospects of use: monograph / Kotlov V.G. // Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2020. – 190 p.]
2. Котлов В.Г., Кузнецова Ю.А. Расчет эффективности использования металлических зубчатых пластин для соединения дощатых ферм // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 69-80. – EDN NBIFVF. [Kotlov V. G., Kuznetsova Yu. A. Calculation of the efficiency of using nail plates for connecting plank farms // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2019. – No. 3. – P. 69-80. – EDN NBIFVF.]
3. Сахаров А.А., Чмаркова С.В. Применение комбинированных балок перекрытия в малоэтажном строительстве // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 105-109. – EDN AKQDIA. [Sakharov A.A., Chmarkova S.V. The use of combined floor beams in low-rise construction // Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and Construction Technologies: Collection of articles of the 79<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 18-22, 2022 / Edited by M.V. Shuvalov, A.A. Pishchulev, A.K. Strelkov. – Samara: Samara State Technical University, 2022. – P. 105-109. – EDN AKQDIA.]
4. Connector: patent US2877520A decl. 1956-09-12; publ. 1959-03-17
5. Жидков К.Е, Зверев В.В., Капырин Н.В. Экспериментальные натурные исследования деревянных ферм на металлических зубчатых пластинах // Строительная механика и конструкции. – 2021. – № 4(31). – С. 90-98. – DOI 10.36622/VSTU.2021.31.4.008. – EDN RLGOFG. [Zhidkov K.E., Zverev V.V., Kapyrin N.V. Experimental field studies of wooden trusses on nail plates // Construction mechanics and structures. – 2021. – № 4(31). – P. 90-98. – DOI 10.36622/VSTU.2021.31.4.008. – EDN RLGOFG.]
6. Габриелян Г.Е. и др. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния несущей системы деревянного здания // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 1(16). – С. 116-124. – EDN YSLUJO. [Gabrielyan G.E. Finite element modeling of the stress-strain state of the bearing system of a wooden building // Construction mechanics and structures. – 2018. – № 1(16). – P. 116-124. – EDN YSLUJO.]
7. Селютина Л.Ф, Емельянова. Н.В. Экспериментально-теоретические исследования дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3(40). – С. 120-129. – EDN LNYEXU. [Selyutina L.F., Yemelyanova N.V. Experimental and theoretical studies of plank trusses with nodular joints on metal toothed plates // Regional architecture and construction. – 2019. – № 3(40). – P. 120-129. – EDN LNYEXU.]
8. Paiva Lucas, Braz César Manuel, Paula, António. (2020). Numerical Analysis of Load Distribution in Joint Lines with Punched Metal Plate Fasteners. KnE Engineering. 10.18502/keg.v5i6.7023.
9. Rogainis Agris, Serduks Dmitrijs, Buka-Vaivade Karina, Akishin Pavel, Sahmenko Genadijs, Briuka Elza, Lapkovskis, Vjaceslavs (2024). Verification of a Simplified Design Method for Timber-Concrete Composite Structures with Metal Web Timber Joists. Applied Sciences. 14. 1457. 10.3390/app14041457.
10. Dobeš Pavel, Lokaj Antonín, Vavrušová, Kristýna. (2023). Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on

- Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. Buildings. 13. 200. 10.3390/buildings13010200.
11. Amaruddin, Haslin & Hassan, R.. (2022). 3d finite element analysis of a wood dowel in bending perpendicular to the grain. Vol 5, No 1. P. 69-76.
  12. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference Release 2021 R1 /ANSYS, Inc // 2021 – 962 p.
  13. Котлов В.Г., Шарынин Б.Э. Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (Часть 1) // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 58-63. – EDN YQNYDB. [Kotlov V.G., Sharynin B.E. Development of a model of wood material for finite element analysis of building structures (Part 1) // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2018. - No. 2. - P. 58-63. – EDN YQNYDB]
  14. Котлов В.Г., Шарынин Б.Э. Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (часть 2) // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4. – С. 19-24. – DOI 10.25686/2542-114X.2019.4.19. – EDN FSYHLK. [Kotlov V.G., Sharynin B.E. Development of a model of wood material for finite element analysis of building structures (part 2) / V. G. Kotlov, B. E. Sharynin // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2019. – No. 4. – P. 19-24. – DOI 10.25686/2542-114X.2019.4.19. – EDN FSYHLK]
  15. Шинкарев А.С. и др. Опыт прокатки многослойных листов на основе композиции сталей 08КП и У8 // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 9. – С. 1-10. – DOI 10.7463/0916.0846195. – EDN XBGBWL [Shinkarev A.S. et al. The experience of rolling multilayer sheets based on the composition of 08KP and U8 steels // Science and Education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University. – 2016. – No. 9. – P. 1-10. – DOI 10.7463/0916.0846195. – EDN XBGBWL]
  16. Sergio Schneidera , Sandra Giacomin Schneidera, Helena Marques da Silvab, Carlos de Moura Netob Study of the Non-Linear Stress-Strain Behavior in Ti-Nb-Zr Alloys // Faculdade de Engenharia Química de Lorena b ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. – 4 p.
  17. / Ellegaard, P. Analysis of Timber Joints With Punched Metal Plate Fasteners: With Focus on Knee Joints. // Ph.D. thesis, Aalborg University (Denmark), 2002. – 255 p.
  18. Evaluation Listing CCMC 11996-L MT20 /National Research Council of Canada// 2018-03-12
  19. Isupov, S.A., Chaganov A.B. Strength and stiffness of wood structures for compounds of gang nail plate «Steelcap» // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, September 25–27, 2019. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033015. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033015. – EDN ZPCVQE.
  20. Peter Niemz, Alfred Teischinger, Dick Sandberg Springer Handbook of Wood Science and Technology // Springer Nature Switzerland AG, 2023 – 2063 p. – DOI 10.1007/978-3-030-81315-4
  21. Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В. Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 5. – С. 697-708. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708. – EDN RTOQXE. [Zinnurov T.A., Novitsky E.V. Determination of deflection of composite wooden bent elements reinforced with cylindrical polymer composite dowels // Bulletin of MGSU. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – P. 697-708. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708. – EDN RTOQXE]
  22. Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р. Новый узел соединения деревянных элементов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия:

Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 2. – С. 62-69. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.62. – EDN AIDAAV. [Kuznetsov I.L., Gimranov L.R. A new junction of wooden elements // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2020. – No. 2. – P. 62-69. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.62. – EDN AIDAAV.]

#### Информация об авторах

**Шарынин Богдан Эдуардович**, аспирант, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация  
*E-mail: bogdan.sharynin@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7600-3668*

#### Information about the authors

**Bogdan E. Sharynin**, post-graduate student, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russian Federation  
*E-mail: bogdan.sharynin@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7600-3668*



УДК: 625.7/8.05, 658.51

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13

EDN: NDANNY

## Моделирование условий работы и подбора комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования

**Н.А. Ермошин<sup>1</sup>, В.А. Борисов<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** Главной проблемой создания комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования является их узкая направленность и низкая вариативность. Необходимо разработать метод моделирования условий работы дорожных машин, в результате применения которого качество производимых работ останется на том же уровне, но появится экономический эффект. Важно учитывать вероятностный характер факторов, включая динамику внешней среды, характеристики грунта, а также колебания стоимости строительных материалов, их транспортировки, затрат, связанных с условиями эксплуатации дорожно-строительных машин и оборудования. Цель работы состоит в создании методики обоснования комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования, удовлетворяющих широкому спектру меняющихся условий. Задачами исследования является: создание алгоритма моделирования условий функционирования комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования; логико-математическое описание способа выбора конкретных единиц техники из множества возможных вариантов; количественное эквивалентирование ограничений на ресурсы, объемы работ и последовательность их выполнения.

**Результаты.** Предложенная методика позволяет обосновать вариант комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования и производить его корректировку (адаптацию) к меняющимся условиям выполнения работ по производству, заготовке и транспортировке материалов и конструкций, возведению земляного полотна, устройству основания, устройству асфальтобетонного покрытия. Разработанная методика также позволяет адаптировать комплект дорожно-строительных машин и механизмов не только к изменению объемов работ и техническому обеспечению строительной организации, но и к финансовым возможностям подрядчика.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что за счет создания адаптивного комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования для производства работ по строительству автомобильных дорог возможно сокращение затрат на формирование, эксплуатацию и возможную адаптацию комплекта.

**Ключевые слова:** условия функционирования, комплект дорожно-строительных машин, технологическое оборудование, математическая модель, адаптация

**Для цитирования:** Ермошин Н.А., Борисов В.А. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования // Известия КГАСУ 2024, № 2(68), с. 147-158, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13, EDN: NDANNY

# Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment

N.A. Ermoshin<sup>1</sup>, V.A. Borisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The main problem in creating sets of road-building machines and technological equipment is their narrow focus and low variability. It is necessary to develop a method for modeling the operating conditions of road machines, as a result of which the quality of the work performed will remain at the same level, but an economic effect will appear. It is important to take into account the probabilistic nature of factors, including the dynamics of the external environment, soil characteristics, as well as fluctuations in the cost of building materials, their transportation, and costs associated with the operating conditions of road-building machines and equipment. *The purpose of the work* is to create a methodology for justifying sets of road-building machines and technological equipment that satisfy a wide range of changing conditions. The objectives of the research are: creating an algorithm for modeling the operating conditions of sets of road construction machines and technological equipment; logical and mathematical description of the method for selecting specific units of equipment from a variety of possible options; quantitative equivalence of restrictions on resources, volumes of work and the sequence of their implementation.

*Results.* The proposed methodology makes it possible to justify the option of a set of road construction machines and technological equipment and to adjust it (adapt) to the changing conditions of work on the production, procurement and transportation of materials and structures, construction of the roadbed, foundation construction, and asphalt concrete pavement construction. The developed methodology also makes it possible to adapt a set of road-building machines and mechanisms not only to changes in the scope of work and technical support of the construction organization, but also to the financial capabilities of the contractor.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is that by creating an adaptive set of road-building machines and technological equipment for the construction of highways, it is possible to reduce the costs for the formation, operation and possible adaptation of the set.

**Keywords:** operating conditions, road construction machinery set, technological equipment, mathematical model, adaptation

**For citation:** Ermoshin N.A., Borisov V.A. Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 147-158, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13, EDN: NDANNY

## 1. Введение

Качество строительства автомобильных дорог в значительной степени зависит от правильного подбора комплектов строительных машин и технологического оборудования в целях реализации применяемых технологий и достижения требуемых технико-экономических и транспортно-эксплуатационных показателей строящихся объектов [1, 2]. К настоящему времени для транспортного строительства имеется возможность выбора машин и оборудования для дорожных работ. Поэтому возникает задача оптимизации выбора комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования (далее КДСМ) с учетом их эксплуатационных свойств и условий выполнения работ. Прежде всего, это касается производительности техники и объемов работ, природно-климатических и грунтово-гидрологических условий их выполнения, технологических факторов строительства или реконструкции автомобильных дорог, требований к точности и стабильности технологических процессов производства работ [3-5].

Решение этой задачи возможно за счет совершенствования существующих и разработки новых подходов и методов обоснования КДСМ с необходимыми эксплуатационными свойствами для строительства объектов в тех или иных условиях [6-7].

В настоящее время достаточно часто используются методические рекомендации [8-9] и эмпирический метод, основанный на опыте формирования комплектов для производства строительных работ на предыдущих объектах строительства. Данные рекомендации и метод, являются, по сути, методом аналогов, не является эффективными, так как не учитывают меняющиеся условия строительства. Кроме этого, имеющийся опыт формирования КДСМ может быть недостаточен в связи с появлением новых типов машин с иными производственно-техническими характеристиками и условиями их применения [10-12]. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях экономических санкций и необходимости импортозамещения дорожно-строительной техники. Ошибки и просчеты при создании КДСМ могут привести к значительным финансовым издержкам, вызванным простоями техники. В свою очередь отсутствие необходимых машин и технологического оборудования в составе комплектов повлечет срыв установленных сроков производства работ и ввода объектов дорожного строительства в эксплуатацию [13-14].

Известен метод формирования комплектов на основе «библиотечных» данных (типовых комплектов). При всех своих положительных свойствах, обусловленных возможностью применения блочно-модульного принципа создания КДСМ, он тоже имеет свои недостатки. Самым важным из них является то, что метод не в полной мере учитывает особенности условий строительства (геологические, климатические и др. условия).

Методы научного обоснования состава комплектов машин должны содержать алгоритмы и процедуры моделирования выбора конкретных единиц техники из множества возможных вариантов по определенному критерию с учетом стохастичности ограничений, эквивалентных условиям, структуре, объемам работ и последовательности их выполнения. Следует отметить, что стохастичностью обладают не только факторы окружающей среды (климатические, грунтовые, гидрологические условия и др.), но также и стоимость дорожно-строительных материалов и конструкций, стоимость доставки и использования машин, оборудования и механизмов, используемых при производстве дорожных работ, что способствует появлению новых видов затрат [15-16].

Указанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости совершенствования способа формирования комплекта на основе учета условий работы дорожно-строительных машин, способных выполнять свои функции с требуемым качеством и экономичностью.

Поэтому целью работы является создание методики для наиболее точного прогнозирования эффективности применения дорожно-строительных машин в различных условиях строительства. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- создание методики, отражающей условия строительства дорог и учитывающей все особенности местности, климата и других факторов;
- выбор наиболее подходящей техники из всех имеющихся вариантов, исходя из заданных критерии (производительности, эффективности, стоимости и др.).

## **2. Материалы и методы**

Формализация условий работы КДСМ предусматривает выявления основных факторов, влияющих на выполнение работ по строительству автомобильных дорог. В этом отношении целесообразно руководствоваться закономерностью, подмеченной Р. Акоффом: «Как правило, степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании». Исходя из этого, для повышения эффективности применения дорожно-строительных машин при флюктуации условий их работы, эти условия целесообразно моделировать через количественные показатели требований, которым должен соответствовать состав КДСМ.

Математическая постановка задачи моделирования условий формирования и работы КДСМ может быть сформулирована следующим образом.

Пусть для выполнения какого-либо комплекса работ (устройство земляного полотна, щебеночного основания, асфальтобетонного покрытия)  $G_o$  требуется обосновать состав комплекта дорожно-строительных машин, соответствующего условиям применения (требованиям)  $B=\|b_i\|$ , ( $i=1,\dots,n$ ). При этом количественные значения (эквиваленты) требований (номенклатура работ и их объемы; погодно-климатические, грунтово-геологические условия их выполнения; ресурсоемкость и др.) известны.

Выполнение комплекса работ  $G_o$  может быть выполнено с применением соответствующих дорожно-строительных машин и технологического оборудования. Существует возможность рассмотреть ограниченное множество вариантов  $X$  структурных элементов комплекта (отдельных дорожно-строительных машин и технологического оборудования) и КДСМ в целом. Варианты структурных элементов комплекта ( $x_{ij}$ ) могут отличаться один от другого экономичностью  $c_{ij}$ , производительными возможностями  $a_{ij}$ , показателями стабильности и точности выполнения работ  $t_{ij}$ , и др. При этом считаются известными такие показатели качества структурных элементов или единиц  $x_{ij}$ , как надежность, безопасность, мобильность и др. Такая информация может быть получена на основе существующих нормативных данных (руководство по эксплуатации, нормативно-техническая документация), либо рассчитаны по методикам, изложенным в ГОСТ Р 27.010-2019.

Необходимо выбрать такой состав КДСМ, который позволяет выполнить дорожно-строительные работы с учетом требований  $B=\|b_i\|$  при минимуме затрат на его формирование и эксплуатацию.

Логико-математическое описание этой задачи можно представить следующим образом.

Требуется найти минимум целевой функции (1):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min , \quad (1)$$

с учетом ограничений  $B=\|b_i\|$ :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq b_i , \quad (2)$$

$$t_{ij} \geq t'_{ij} , \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^{nom} x_{ij} \geq b_n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1 , \quad (5)$$

$x_{ij}$  - целые числа для  $\forall_{ij}$ , (6)

$$x_{ij} \geq 0 , \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq v_{ij} , \quad (8)$$

где  $i$  – индекс вида работ КДСМ и требования к ним, реализация которого необходима при выполнении комплекса работ  $G_o$ ;

$j$  – индекс, типа (номер варианта выбора) машины для выполнения работ  $i$ -го вида (для каждого вида работ могут применяться разные машины и технологическое оборудование);

$x_{ij}$  – число структурных единиц (машин и технологическое оборудование) для выполнения работ  $i$ -го вида машиной  $j$ -го типа в составе КДСМ (искомые переменные);

$c_{ij}$  – общие, приведенные к текущему моменту времени (момент принятия решения), затраты на покупку (аренду) и применение машин  $j$ -го типа для выполнения работ  $i$ -го вида в составе КДСМ;

$b_i$  – количественный эквивалент (значение)  $i$ -го условия (требования) к комплекту КДСМ;

$a_{ij}$  и  $a_{ij}^{\text{пот}}$  – соответственно, нормативные и потенциальные производственные возможности структурной единицы КДСМ (машина, технологическое оборудование)  $x_{ij}$ , для выполнении работ при реализации условия  $b_i$ , то есть по выполнению  $i$ -го требования к КДСМ;

$t_{ij}$  и  $t'_{ij}$  – соответственно, фактический и требуемый показатель точности технологических процессов производства работ  $i$ -го вида структурной единицей КДСМ (машиной, технологическим оборудованием  $j$ -го типа);

$v_{ij}$  – допустимое значение  $x_{ij}$  (ограничивается допустимым числом структурных единиц в составе КДСМ).

В передложенной математической модели обоснования состава КДСМ целевая функция и ограничения имеют следующую сущность: целевая функция (1) позволяет рассчитать состав комплекта машин и технологического оборудования при минимуме затрат на его формирование и эксплуатацию при ограничениях, отраженных неравенствами (2-7). Их физический смысл заключается в следующем:

- ограничения (2-4) обуславливают необходимость расчета целевой функции с учетом выполнения всех требований, предъявляемых к КДСМ, и являющихся компонентами вектора  $B = \|b_i\|$ ;
- ограничение (5) обеспечивает наличие в составе КДСМ не менее одной структурной единицы (машины или технологического оборудования);
- ограничения (6-7) необходимы для обеспечения целочисленности и неотрицательности переменных  $x_{ij}$ ;
- ограничение (8) позволяет избежать ситуации, при которой число структурных единиц в составе КДСМ оказывается избыточным, либо по критерию управляемости, либо по критерию обслуживания и размещения.

Однако такое логико-математическое описание задачи в наибольшей степени подходит для формирования КДСМ, отличающихся незначительным разнообразием видов выполняемых работ. Как правило, это звено. В то же время, когда количество видов работ и технологических процессов резко возрастает данная постановка задачи ввиду увеличения размерности факторного пространства, числа ограничений и переменных оказывается неприемлемой. Требуется корректировка рассмотренной задачи в целях включения в состав КДСМ машин или даже структурных элементов различного предназначения (для выполнения подготовительных, транспортных работ, устройства основания, устройства дорожного покрытия и др.). В этом случае удобно представить формирование КДСМ в виде следующей системы математических формул, соотношений и неравенств в векторной форме:

$$\begin{aligned} CX \rightarrow \min \\ \left\{ \begin{array}{l} AX = b \\ X \geq 0 \end{array} \right. , \end{aligned} \quad (9)$$

с учетом ограничений:

где  $C = (c_1, \dots, c_n)$  – приведенные затраты на комплектование и применение структурных единиц (структурных подразделений КДСМ);

$X = (x_1, \dots, x_n)^T$  – структурные единицы (машины, технические средства, структурные подразделения);

$A = \|a_{ij}\|$ , ( $i=1, \dots, n$ ), ( $j=1, \dots, m$ ) – показатели производительности, надежности, мобильности структурных единиц (структурных элементов), являющиеся коэффициентами ограничений модели (9);

$(b_1, \dots, b_n)$  – показатели требований к составу КДСМ по выполнению дорожно-строительных работ в установленные сроки.

В целях обоснования состава КДСМ множество его вариантов  $X$  следует разбить на  $S$  подмножеств. Для этого вектор  $X$  отображается как  $X = (x^1, x^2, \dots, x^k, \dots, x^S)^T$ . Здесь  $x^k = (x_{1k}^k, \dots, x_{nk}^k)^T$  транспонируется.

По аналогии можно представить векторы  $b$  и  $C$  в виде:

$$b = (b^0, b^1, b^2, \dots, b^k, \dots, b^S)^T,$$

$$C = (c^1, c^2, \dots, c^k, \dots, c^S)^T,$$

где  $b^k = (b_{1k}^k, \dots, b_{mk}^k)^T$ ,  $c^k = (c_{1k}^k, \dots, c_{nk}^k)^T$ ,  $b^0 = (b_{10}^0, \dots, b_{l0}^0)^T$ ,  $k = 1, \dots, S$ .

Для строительства автомобильных дорог матрица ограничений представляется как совокупность некоторых блоков  $A^k$  и  $D^k$  ( $k = 1, \dots, S$ ) в виде (10):

$$A = \begin{vmatrix} A^1 & A^2 & \dots & A^k & \dots & A^S \\ D^1 & & & & & \\ & D^2 & & & & \\ & & \ddots & D^k & & \\ & & & & \ddots & D^S \end{vmatrix} \quad (10)$$

где  $A^k = \|a_{ij}^k\|$ , ( $i=1, \dots, l$ ), ( $j=1, \dots, m_k$ );  $D^k = \|d_{ij}^k\|$ , ( $i=1, \dots, n_k$ ), ( $j=1, \dots, m_k$ ).

При таком подходе модель математического программирования (9) можно записать в следующем виде (11):

минимизировать  $F = C^1 X^1 + C^2 X^2 + \dots + C^k X^k + C^S X^S$ ;

при ограничениях:

$$A^1 X^1 + A^2 X^2 + \dots + A^k X^k + A^S X^S = b^0 D^1 X^1 = b^1 D^2 X^2 = b^2 \dots D^k X^k = b^k \dots D^S X^S = b^S, \quad (11)$$

$$X^k \geq 1, X^k \leq V^k.$$

Значение искомых переменных, ограничений и параметров этой задачи интерпретируются следующим образом:

$X^k$  – вектор возможных вариантов состава КДСМ, которые могут подлежать сравнительному анализу в целях выбора лучшего из них по критерию затрат для выполнения  $k$ -го комплекса дорожно-строительных работ;

$C^k$  – вектор приведенных затрат, необходимых для формирования и эксплуатации вариантов КДСМ в целях выполнения  $k$ -го комплекса работ;

$D^k$  – вектор показателей производственных возможностей и эксплуатационных свойств, характеризующих «вклад» каждой структурной единицы КДСМ в выполнение  $k$ -го комплекса работ;

$b^k$  – вектор объемов ограничений, накладываемых на структурную единицу (машину, технологическое оборудование), включаемую в состав КДСМ для реализации  $k$ -го комплекса работ;

$A^k$  – матрица показателей производственных возможностей, которые являются "вкладом" структурной единицы в выполнение  $k$ -го комплекса работ и достижение общих требований к комплекту в целом;

$b^0$  – вектор показателей, характеризующих выполнение требований своевременности производства работ составом КДСМ в целом;

$V^k$  – вектор показателей, характеризующих допустимое число структурных элементов в составе КДСМ для выполнения  $k$ -го комплекса работ;

$S$  – количество видов работ по строительству участка автомобильной дороги, требующих создания КДСМ.

После приведенных объяснений предлагается следующая форма записи задачи формирования составов КДСМ для строительства автомобильных дорог (12):

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{k=1}^S C^k X^k \xrightarrow{x} \min \\ & \text{при условиях} \\ & \sum_{k=1}^S A^k X^k = b^0, D^k X^k = b^k \\ & X^k \geq 1, \quad X^k \leq V^k \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Предложенный поход к обоснованию состава КДСМ обеспечивает возможность построения математической модели условий выполнения дорожно-строительных работ. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин при такой постановке задачи может быть выполнено на основе варьированию векторов общих ( $b^0$ ) и независимых ( $b^k$ ) ограничений, а также коэффициентов ( $C^k$ ) функционала (затрат на формирование и функционирование комплектов) модели (12).

Общая структура методики моделирования условий работы КДСМ показана далее (рис. 1).

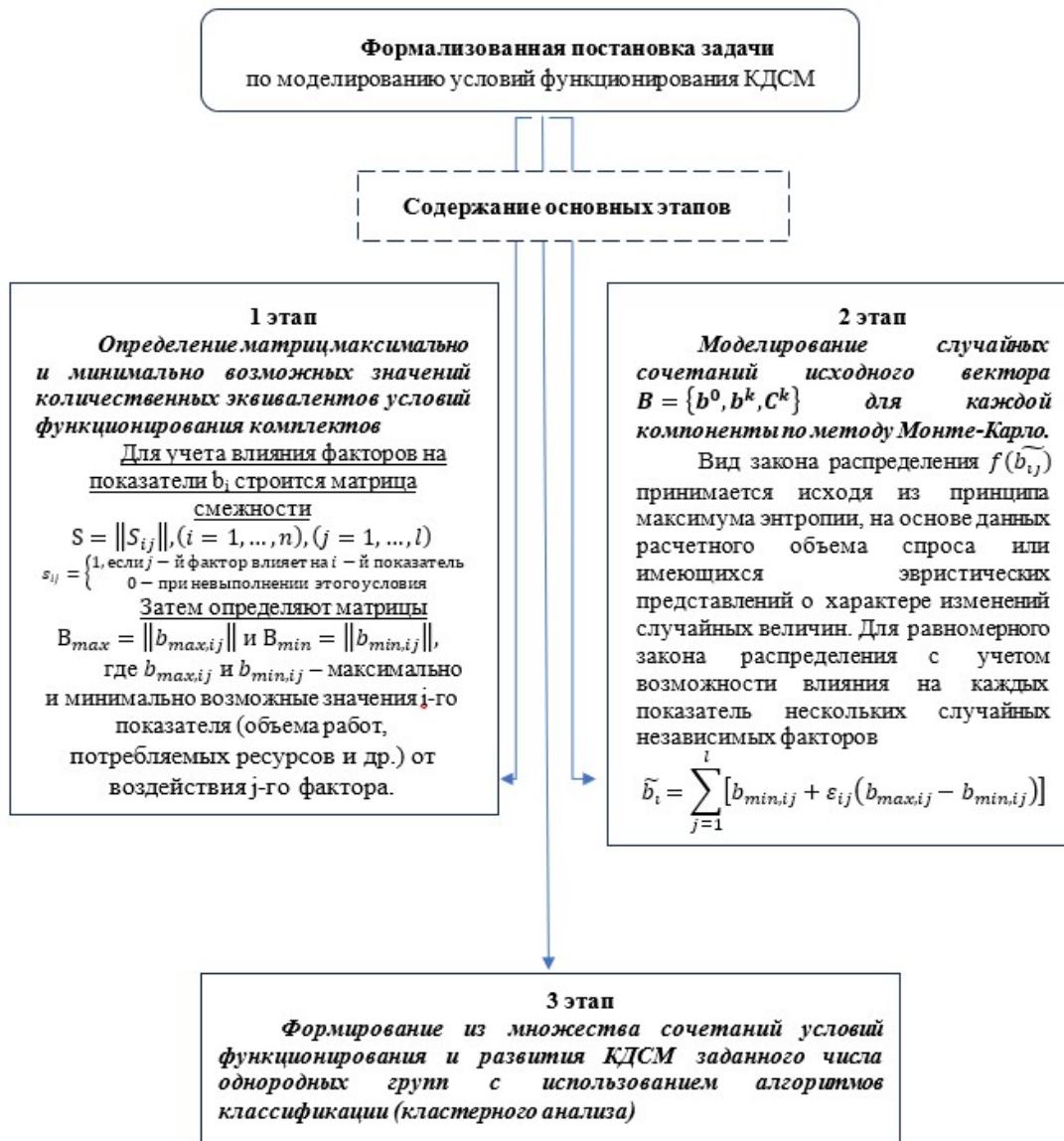


Рис. 1. Общая структура методики моделирования условий работы КДСМ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. The general structure of the methodology for modeling the working conditions of the RBMS (illustration by the authors)

### 3. Результаты и обсуждение

Математическая постановка задачи моделирования условий формирования и работы комплекта дорожно-строительных машин состоит в следующем.

Имеется вектор  $B = \{b^0, b^k, C^k\}$ , основными элементами которого являются количественные показатели, характеризующие общие, независимые ограничения и коэффициенты функционала модели линейного программирования (12). Каждый из элементов заданного вектора  $B = \|b_i\|$ , ( $i=1, \dots, n$ ) характеризует условия работ по строительству автомобильных дорог и может принимать различные значения на отрезке  $[b_{min,i}, b_{max,i}]$ . Количественные значения этих условий определяют требования к составу и структуре КДСМ.

По итогам моделирования необходимо получить необходимое множество случайных сочетаний  $\{M\}$  векторов  $\tilde{B} = \{\tilde{b}^0, \tilde{b}^k, \tilde{C}^k\}$  исходного вектора  $B$ . При этом требуется учитывать:

а) совокупность случайных факторов, влияющих на изменения каждого элемента  $b_i$  (объемов дорожных работ и ресурсно-экономического обеспечения формирования и функционирования КДСМ);

б) синхронность (одновременность или воздействие через равные временные периоды) воздействия случайных факторов на элементы вектора  $B$ .

Решение сформулированной задачи осуществляется поэтапно.

*Первый этап* состоит в построении матрицы смежности в целях учета влияния факторов (условий выполнения работ) на показатели выполнения требований к КДСМ  $S = \|s_{ij}\|$ , ( $i=1, \dots, n$ ), ( $j=1, \dots, l$ ).

Элементы построенной матрицы отражают степень влияния факторов на показатели ограничений. На этой основе определяются матрицы  $B_{max} = \|b_{max,ij}\|$  и  $B_{min} = \|b_{min,ij}\|$ , где  $b_{max,ij}$ ,  $b_{min,ij}$  – максимальное и минимальное возможные значения  $i$ -го показателя от воздействия  $j$ -го фактора.

*Второй этап* сводится к имитации случайных значений элементов заданного вектора  $B$  для каждой его компоненты. Моделирование осуществляется на основе допущения о виде функции плотности распределения случайной величины  $\tilde{b}_{ij}$ ,  $f(\tilde{b}_{ij})$ .

Предположение о виде закона распределения  $f(\tilde{b}_{ij})$  принимается в соответствии с принципом максимума энтропии. Дополнительно могут использовать результаты ранее выполненных исследований или эвристические представления о закономерностях флуктуаций случайных величин  $\tilde{b}_{ij}$ .

Если известен только интервал изменения случайной величины  $\tilde{b}_{ij}$ , то принимается равномерный закон распределения. При этом случайная величина  $\tilde{b}_{ij}$  определяется по зависимости (13):

$$\tilde{b}_{ij} = b_{ij} + \xi_{ij} (b_{ij} - b_{ij}), \quad (13)$$

где  $\xi_{ij}$  – случайное число, распределенное равномерно на отрезке [0,1].

Окончательные значения случайных компонент каждого их векторов  $\tilde{B}$  вычисляются с учетом возможности синхронного влияния на каждый  $b_i$ -ый показатель нескольких случайных независимых факторов (14):

$$\tilde{b}_i = \sum_{j=1}^l [b_{ij} + \xi_{ij} (b_{ij} - b_{ij})], \quad (14)$$

где  $l$  – количество факторов, влияющих на  $i$ -й показатель (требование).

Аналогичные преобразования с использованием известных методик можно построить и для других законов распределения.

Достаточное количество реализаций модели позволяет найти совокупность сочетаний условий формирования и функционирования КДСМ  $M = \{\tilde{B}_m\}$ , ( $m=1, \dots, M$ ). Следует отметить, что полученная в результате моделирования совокупность имеет большую размерность. Это приведет к значительным затратам времени на выполнение последующих оптимизационных расчетов состава КДСМ по модели (12). В такой ситуации целесообразно сократить число сочетаний (групп) меняющихся условий

производства дорожно-строительных работ и ресурсно-экономического обеспечения формирования и эксплуатации КДСМ до значения  $N << M$ .

На третьем этапе из поученного множества сгруппированных условий производства дорожно-строительных работ, формирования и эксплуатации КДСМ  $M$  кластеризуется заданное число однородных групп  $N$ .

С этой целью каждая полученная группа исходных данных (вектор  $\tilde{B}_m$ ) множества  $M$  сравнивается друг с другом. Сравнение осуществляется посредством определения меры близости между случайными значений  $\tilde{b}_{mi}$  сравниваемых векторов  $\tilde{B}_m$ . Вполне естественно, что однородным условиям формирования и эксплуатации (объемы финансирования, технологические ресурсы, номенклатура и объемы дорожных работ и др.) соответствуют близкие значения величин  $\tilde{b}_{mi}$  группируемых сочетаний условий  $M = \{\tilde{B}_m\}$ . В связи с этим объединение в группы производится так, чтобы сила взаимосвязи между сочетаниями условий внутри группы была больше, чем между сочетаниями условий в разных группах.

В качестве меры тесноты связи  $d_{mm'}$  используется евклидово расстояние, между двумя сочетаниями условий  $\tilde{B}_m$  и  $\tilde{B}_{m'}$  в  $n$ -мерном пространстве ( $n$  - размерность вектора  $B$ ) (15):

$$d_{mm'} = \sum_{i=1}^n p_i^2 (\tilde{b}_{mi} - \tilde{b}_{m'i})^2, \quad (15)$$

где  $\tilde{b}_{mi}$  и  $\tilde{b}_{m'i}$  – численные значения  $i$ -ой компоненты векторов ограничений и коэффициента функционала ( $C^k$ ) в  $m$ -ой и  $m'$ -ой реализации модели;

$p_i$  – нормирующий коэффициент  $i$ -ой компоненты (элемента вектора), определяемый нормированием пространства расстояний относительно каждой  $i$ -ой компоненты (применяется для перевода значений ограничений из абсолютных в относительные величины, т.е. для «устранения размерности»).

Последовательность группировки условий с помощью алгоритмов кластеризации начинается с того, что из общего числа сочетаний первые  $N$  сочетаний условно принимаются за центры групп и по формуле (15) вычисляется матрица попарных расстояний между ними  $D^N = \|d_{mm'}\|$ .

Далее последовательно рассматривается каждое из оставшихся ( $M - N$ ) сочетаний условий, определяется его расстояние до каждого из первых  $N$  сочетаний и выбирается наименьшее из них. Если это расстояние меньше минимального расстояния между первыми  $N$  сочетаниями, то рассматриваемое сочетание объединяется в одну группу с тем из них, к которому оно ближе расположено. В противном случае объединяются между собой два близко расположенных из первых  $N$  сочетаний, а рассматриваемое сочетание является центром новой группы. Принципиальная схема определения тесноты связей между сочетаниями условий представлена ниже (рис. 2).

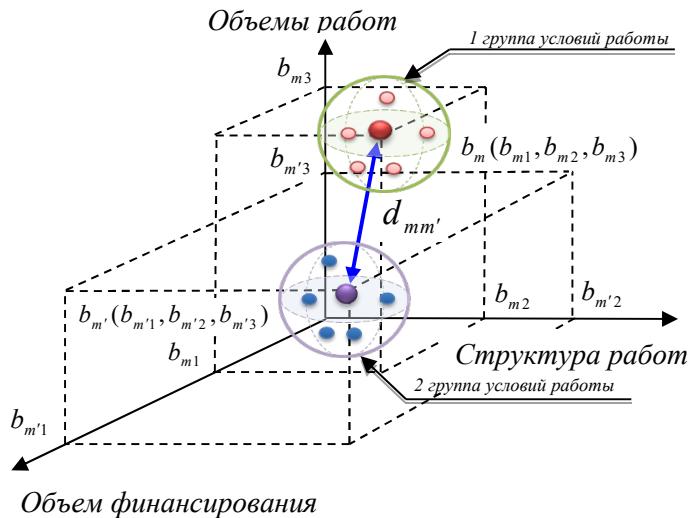


Рис. 2. Принцип определения силы связи между группами условий (илюстрация авторов)  
Fig. 2. A schematic diagram for determining the tightness of connections between combinations of conditions (illustration by the authors)

Действия по этому алгоритму выполняются последовательно для всех  $(M - N)$  сочетаний, после чего они оказываются распределенными по  $N$  группам. В качестве исходных данных для построения состава КДСМ по модели (12) используется только по одному вектору  $\tilde{B}_n, (n = 1, \dots, N)$  из каждой сформированной группы.

#### 4. Заключение

1. Предложена методика моделирования условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования, отражающая условия строительства дорог и учитывающая все особенности местности, климата и других факторов. Методика заключается в имитации стохастических факторов, характеризующих условия строительства и объединении их в группы с помощью методов кластерного анализа. В отличие от имеющихся, методика позволяет учитывать особенности строительства дорог, обусловленные их линейной протяженностью и необходимостью выполнения работ в разных природно-климатических, грунтово-геологических и ресурсно-экономических условиях. Разработка методики обеспечивает возможность повышения эффективности подбора состава комплектов дорожно-строительных машин и их адаптации к меняющимся условиям производства дорожно-строительных работ.

2. Обоснована постановка задачи выбора состава комплектов дорожно-строительных машин, включая логико-математическое описание процесса ее решения. Для решения задачи используется метод декомпозиции (блочного линейного программирования). При этом в качестве общих ограничений задачи выступают ресурсы. Частными ограничениями являются объемы, структура дорожно-строительных работ и условия их выполнения. Варианты и количество структурных элементов КДСМ представляют собой управляемые переменные, а затраты на них исполняют значение коэффициентов целевой функции. Это позволяет выбрать состав комплектов дорожно-строительных машин, удовлетворяющих широкому спектру меняющихся условий работы, по критерию оптимизации затрат не только на их формирование, но и адаптацию.

#### Список литературы/References

1. Абдулаев М.Н., Омаров А.З., Расулова А.П., Ахмедова С.А. Обоснование рациональной области использования взаимозаменяемых машин на строительстве или ремонте дорожных объектов // Транспортное дело России, №5. 2023. С. 226-231. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_5\_226 [Abdulaev M.N., Omarov A.Z., Rasulova A.P., Akhmedova S.A. Rationale for the rational use of interchangeable machines in the

- construction or repair of road facilities // Transport Business of Russia, No. 5. 2023. P. 226-231. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_5\_226]
2. Гарманов, Е.М., Метод моделирования эксплуатационных характеристик строительных и дорожных машин // Повышение эффективности дорожного хозяйства в условиях интенсивной автомобилизации страны: сб. науч. тр. МАДИ(ГТУ). - М.: Изд-во МАДИ(ГТУ), 2006.- С. 23-36 [Garmanov, E.M., Method for modeling the operational characteristics of construction and road machines // Improving the efficiency of road management in the conditions of intensive motorization of the country: collection of scientific works. MADI (GTU). - M.: Publishing house MADI (GTU), 2006.- P. 23-36.]
  3. Arzu Uzun, Ahmet Ozdogan, (2012) "Maintenance parameters based production policies optimization", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 18 Issue: 3, P.295-310,. DOI: 10.1108/13552511211265884 .
  4. Габдуллин Т.Р. Разработка обучающих тренажеров дорожно-строительных машин // Техника и технология транспорта. 2018. №4(9). С. 2. [Gabdullin T.R. Development of training simulators for road construction machines // Equipment and technology of transport. 2018. No. 4(9). P. 2.]
  5. Габделхаев Р.Р., Габдуллин Т.Р. Автоматизация дорожно-строительной техники // Техника и технология транспорта №4 (15). 2019 [Gabdelkhaev R.R., Gabdullin T.R. Automation of road construction equipment // Transport technology and technology No. 4 (15). 2019.]
  6. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic zoning of territories // MATEC Web of Conferences 143, 01012. 2018. DOI: 10.1051201814301012
  7. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A., Yankovskaya A. Application of information systems in road-climatic zoning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012049
  8. Методические рекомендации по выбору рациональных комплектов машин и технологии скоростного строительства земляного полотна в сложных инженерно-геологических условиях МССР – Введ. 20.08.1986 г. – Москва: СоюздорНИИ, 1986. – 47 с. [Methodological recommendations for the selection of rational sets of machines and technology for high-speed construction of roadbeds in the difficult engineering and geological conditions of the MSSR – Int. 08/20/1986 - Moscow: SoyuzdorNII, 1986. - 47 p.]
  9. Методические рекомендации по комплектованию парка машин для текущего ремонта и содержания автомобильных дорог – Введ. 18.02.1974 г. – Москва: ГИПРОДОРНИИ, 1976 – 179 с. [Methodological recommendations for creating a fleet of vehicles for routine repairs and maintenance of highways - Intro. 02/18/1974 - Moscow: GIPRODORNII, 1976 - 179 p.]
  10. Янковская А. Е., Аметов Р. В. Интеллектуальная система для поддержки принятия решений по дорожно-климатическому районированию // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. 2017. С. 36-40 [Yankovskaya A. E., Ametov R. V. Intelligent system for supporting decision-making on road climate zoning // Information technologies in science, management, social sphere and medicine. 2017. P. 36-40.]
  11. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Селиверстов Н. Д. Выбор транспортно-технологических машин // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. № 2. С. 38-41 [Balovnev V.I., Danilov R.G., Seliverstov N.D. Selection of transport and technological machines // Science and technology in the road industry. 2018. No. 2. P. 38-41.]
  12. Ченсов Р.Р., Мухаметшина Р.М. Улучшение долговечности и качества автомобильных дорог // Техника и технология транспорта. 2022. №3 (26). С. 3 [Chensov R.R., Mukhametshina R.M. Improving the durability and quality of highways // Equipment and technology of transport. 2022. No. 3 (26). P. 3]
  13. Мухаметшина Р. М. Обеспечение безопасности при эксплуатации дорожно-строительных машин // Вестник НЦ БЖД. 2017. № 4 (34). С. 93-96

- [Mukhametshina R. M. Ensuring safety during the operation of road-building machines // Bulletin of the Scientific Center of Belarusian Railways. 2017. No. 4 (34). P. 93-96.]
- 14. Nils Rinke, Volker Berkahn, Ingo Neumann, Flitz Berner. Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy // Science Direct magazine. 2017. № 76. P. 24-35.
  - 15. Lamond J. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. West Conshohocken: ASTM International Press, 2018. 655 p.
  - 16. Efimenko S., Efimenko V., Sukhorukov A. Peculiarities of strength and deformability properties of clay soils in districts of Western Siberia // AIP Conference Proceedings 1698, 070020. 2016. DOI: 10.1063/1.4937890

#### Информация об авторах

**Ермшин Николай Алексеевич**, доктор военных наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: ermonata@mail.ru , ORCID: 0000-0002-0367-5375

**Борисов Вячеслав Андреевич**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: vabor01@mail.ru , ORCID: 0000-0002-8596-7020

#### Information about the authors

**Nikolay A. Ermoshin**, doctor of military sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Email: ermonata@mail.ru , ORCID: 0000-0002-0367-5375

**Viacheslav A. Borisov**, post-graduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Email: vabor01@mail.ru , ORCID: 0000-0002-8596-7020



## Предпосылки развития точек роста Казанской агломерации

Т.А. Мусабиров<sup>1</sup>, Ю.А. Закирова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МБУ «Институт развития города»,

<sup>2</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Актуальность исследования обусловлена необходимостью выработки устойчивой модели пространственного развития Казанской агломерации, выявление путей развития и усиления опорного каркаса агломерации, определения очередности мероприятий скоординированного территориального планирования. Цель исследования – выявление перспективных направлений пространственного развития Казанской агломерации, ее точек роста для перехода к поликентрической модели градостроительного развития. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: изучить теоретические исследования в области агломерационного развития; провести комплексный анализ Казанской агломерации; сформировать модель трансформации планировочной структуры Казанской агломерации с учетом потенциальных точек роста, определить мероприятия по их развитию.

**Результаты.** Основные результаты исследования состоят в том, что предложена модель трансформации пространственного развития Казанской агломерации, основанная на выявлении точек роста агломерационного значения и их развития, что повысит уровень жизни жителей агломерации.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для градостроительства состоит в том, что разработанная модель может быть использована для скоординированного, более эффективного пространственно-территориального развития агломерации, для выявления первоочередных мероприятий и территорий, которые в перспективе окажут общий положительный эффект на экономику региона.

**Ключевые слова:** городская агломерация, точки роста, поселения-спутники, поликентричность, урбанизация, маятниковая миграция, Казанская агломерация

**Для цитирования:** Мусабиров Т.А., Закирова Ю.А. Предпосылки развития точек роста Казанской агломерации // Известия КГАСУ, 2024, №2 (68), с. 159-169, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.14, EDN: NUKPQQ

## Prerequisites for the development of growth points of the Kazan agglomeration

Т.А. Musabirov<sup>1</sup>, Yu.A. Zakirova<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> City Development Institute,

<sup>2</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract.** Problem statement. The relevance of the study is due to the need to develop a sustainable model of spatial development of the Kazan agglomeration, identify ways to develop and strengthen the supporting framework of the agglomeration, determine the order of coordinated territorial planning activities. The purpose of the study is to identify promising areas of spatial development of the Kazan agglomeration, its growth points for the transition to a polycentric model of urban development. To achieve the goal, the following tasks were set: to

study theoretical research in the field of agglomeration development; to carry out a comprehensive analysis of the Kazan agglomeration; to form a model for the transformation of the planning structure of the Kazan agglomeration, taking into account potential growth points, to identify measures for their development.

*Results.* The main results of the study are that a model of transformation of the spatial development of the Kazan agglomeration is proposed, based on the identification of points of growth of agglomeration significance and their development, which will increase the standard of living of residents of the agglomeration.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for urban planning lies in the fact that the developed model can be used for coordinated, more effective spatial and territorial development of the agglomeration, to identify priority activities and territories that will have a general positive effect on the economy of the region in the future.

**Keywords:** urban agglomeration, growth points, satellite settlements, polycentricity, urbanization, pendulum migration, Kazan agglomeration

**For citation:** Musabirov T. A., Zakirova Yu. A. Prerequisites for the development of growth points of the Kazan agglomeration //News KSUAE, 2024, №2 (68), p. 159-169, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.14, EDN: NUKPQQ

## 1. Введение

В настоящее время агломерационная форма расселения населения является ключевой, как в России, так и в общемировой градостроительной практике. В истории градостроительства XX век носит название века урбанизации. Именно в это время начали формироваться и активно развиваться городские агломерации. Агломерационная модель расселения стала новой стадией развития, прия на смену городской модели расселения. Термин «агломерация» применительно к модели расселения был введен французским географом Мишелем Руже [1]. Он утверждает, что агломерация возникает тогда, когда концентрация городских видов деятельности выходит за пределы административных границ и распространяется за соседние населенные пункты. Помимо термина «городская агломерация» употребляются термины «метрополия», «локальные системы расселения», «районы больших городов», «хозяйственный округ города» (А.А. Крубер [1]) и др. Советский и российский географ-урбанист Г.М. Лаппо<sup>1</sup> приводит следующее определение понятия городской агломерации: «Городская агломерация – компактная территориальная группировка городских и сельских поселений, объединенных в динамичную локальную систему многообразными интенсивными связями: производственными, деловыми, трудовыми, культурно-бытовыми, рекреационными и прочими, а также совместным использованием ресурсов агломерационного ареала». Г.М. Лаппо выделяет два этапа процесса формирования агломераций в России. Первый этап относится к концу XIX, началу XX вв. Лаппо связывает его с развитием железных дорог и формированием крупных транспортных узлов и объектов, развитием около крупных муниципальных образований предприятий легкой и тяжелой промышленности и объектов коммунального хозяйства, именно тогда начинаются процессы агломерирования. Второй этап развития агломераций проходит в послевоенные годы, вплоть до конца 1980-х годов. В это время происходит рост числа агломераций, усложняется их структура – вокруг крупных центров появляются локальные образования, происходит соразмерность роста муниципальных образований-ядер и зон спутников. Именно во время второго этапа развития агломераций изменяется подход к проектированию городов. Города и системы расселения рассматриваются как изменчивые развивающиеся объекты. Получают распространение концепции линейного города и теория экистики К. Доксиадиса, концепции «Нового элемента расселения (НЭР)» А. Гутнова, И. Лежавы и др., «Кинетическая система расселения» А. Иконникова, К. Пчельникова и пр. Затем появляются концепции рассматривающие города – проект Большого Токио (К. Танге), вертикальные города (У. Чок, Г.Б. Борисовский), проект

<sup>1</sup> Лаппо Г.М. Города России. Взгляд географа // М.: Новый хронограф, 2012. 504 с.

Большого Лондона (Л.П. Аберкромби) и др.<sup>2</sup> Социально-экономический кризис после распада СССР, переход к рыночной экономике, переход городов к постиндустриальной модели позволяют выделить третий этап развития агломераций, который длится по настоящее время. Он характеризуется снижением численности населения из-за естественно убыли, миграцией населения в крупные города [2, 3].

В США при формировании агломераций было характерно более активное развитие пригородов по сравнению с городами. Для нашей же страны характерным процессом агломерирования стал процесс «к городу», когда население не распределяется равномерно по территории агломерации, а стремится находиться ближе к городу-ядру и большинство Российских агломераций являются моноцентрическими [4, 5].

### **Краткий анализ исследований**

Большое количество современных исследований направлено на определение границ агломерации (делимитация). Определение границ агломерации необходимо для полноценного анализа, происходящих в ней процессов, а также для грамотного управления ими [6]. Общепринятой методики делимитации в России до сих пор нет, хотя исследования в этой области ведутся примерно с 1970-х годов, наиболее известные из них это методики ЦНИИП градостроительства и Института географии АН СССР<sup>3</sup> [7]. Важно понимать, что граница агломерации – это не жестко определенный барьер, а динамичная, подвижная зона, которая может расти или, наоборот, сужаться в зависимости от внешних и внутренних факторов: от интенсивности связей, сезонных тенденций. Все существующие методики делимитации агломераций принимают в качестве границы агломерации линию, соединяющую точки с минимальной интенсивностью связей с ядром [6, 7]. Так, методы делимитации зависят от принимаемых критериев оценки интенсивности. Одним из критериев оценки интенсивности при определении границ агломерации служит оценка транспортной доступности от периферии до ядра агломерации (и наоборот)<sup>4</sup>. В основном при определении границ агломерации с помощью оценки транспортной доступности пороговым значением принимается 1,5 часа (в одну сторону), реже допускается двух или трехчасовая доступность [8].

Критерий оценки интенсивности по доли жителям периферии агломерации, работающих на территории ядра. В этом методе оценка проводится в основном путем анализа мигрантовых потоков. Другие критерии интенсивности определения границ агломерации являются более частными и редко используемыми. Примеры таких методов – метод анализа пространственного распределения наружной рекламы; анализ «больших данных»; экспертные интервью; контент-анализ СМИ; интенсивность экономических, политических и культурных связей и пр. Помимо критериев связности для делимитации агломераций рассматривают критерии, оценивающие другие параметры – территориальная сближенность, плотность застройки и населения, границы муниципальных образований и пр.

К другой группе исследований можно отнести изучение стадий развития городских агломераций. Различным аспектам формирования и развития городских агломераций посвящены исследования таких отечественных исследователей, как Е.Н. Перцик<sup>5</sup>, Г.М. Лаппо. Значительная доля исследований посвящена стадиям развития агломерации, среди которых выделяют следующие:

- урбанизация – активный рост ядра агломерации;
- субурбанизация – период, когда рост населения зоны агломерации опережает рост населения ядра;

<sup>2</sup> Иконников А. В. Архитектура XX века. Утопии и реальность. Кн. 2. М.: Прогресс-Традиция, 2002. 676 с.

<sup>3</sup> Полян П.М. Методика выделения и анализа опорного каркаса расселения // М.: ИГ АН СССР, 1988. Ч. 1.

<sup>4</sup> Гольц Г.А. Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981, 248 с.

<sup>5</sup> Перцик Е.Н. Города мира. География мировой урбанизации // М.: Международные отношения. 1999. 382 с.

–дезурбанизация – период, в который население ядра агломерации убывает быстрее, чем население агломерационной зоны;

–реурбанизация – население ядра сокращает темп убыли населения, возобновляется его рост.

Еще одна группа исследований в области изучения городских агломераций посвящена описанию структуры и каркаса агломерации [9, 10]. В структуре агломерации всегда можно выделить ядро (или несколько ядер) и периферийную (спутниковую) зону. Под ядром агломерации понимается центральный город агломерации, на котором замыкается большинство агломерационных связей. Под периферийной зоной понимается территория агломерации за пределами ядра, включающая как городские, так и сельские населенные пункты, связанные с ядром [11]. Также выделяют следующие элементы агломерации – спутники, пригороды, первый пояс агломерации, второй пояс агломерации, Г.М. Лаппо выделяет замыкающие и прочие спутники, агломерации второго порядка, пояса спутников, узлы-«противовесы», транспортные линии.

Одним из основных направлений пространственного развития Российской Федерации является социально-экономическое развитие крупных и крупнейших городских агломераций [12, 13]. Казанская агломерация находится в десятке крупнейших российских агломераций по численности населения и является крупнейшей агломерацией в Республике Татарстан. На сегодняшний день Казанской агломерации имеетmonoцентрический характер градостроительного развития. Ядро агломерации – г. Казань «стягивает» большую часть населения, объекты деловой активности, крупные и уникальные объекты обслуживания (объекты образования, здравоохранения, культуры). Жители агломерации, проживающие за пределами его ядра (в прилегающих районах – Зеленодольский муниципальный район (МР), Высокогорский МР, Пестречинский МР, Лаишевский МР, Верхнеуслонский МР), испытывает нехватку рабочих мест и мест культурного досуга. Поселения-спутники и поселения-спутники Казанской агломерации развиваются слабо, возрастает уровень маятниковой миграции населения [14, 15].

Объект исследования – планировочная структура Казанской агломерации. Предмет исследования – особенности структурно-функциональной системы Казанской агломерации, как предпосылок для выявления точки роста Казанской агломерации (далее – КА).

Целью работы является выявление перспективных направлений развития Казанской агломерации, ее точек роста для перехода к поликентрической модели пространственного развития агломерации.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучить теоретические исследования в области агломерационного развития;
- 2) Провести комплексный анализ Казанской агломерации;

3) Сформировать модель трансформации планировочной структуры Казанской агломерации с учетом потенциальных точек роста, определить мероприятия по их развитию.

## 2. Материалы и методы

Исследование основано на комплексном подходе. Проведен сбор, систематизация и анализ литературных, проектных и картографических материалов в области теории и практики развития агломераций, проведено сравнение данных различных источников для выявления особенностей и тенденций развития городских агломераций и их точек роста. При анализе КА использован системно-структурный подход, который позволяет рассматривать агломерацию как целостную градостроительную систему, вместе с тем состоящую из сложных развивающихся территориальных объектов. Проанализирована градостроительная и нормативно-законодательная документация Российской Федерации, Республики Татарстан, г. Казани, муниципальных образований входящих в границы агломерации. Проведен параметрический анализ территории агломерации: анализ транспортного каркаса территории, размещения промышленности, производственных логистических центров, плотности населения, природно-рекреационного каркаса, зон с особыми условиями использования территории; выявлен опорный каркас агломерации. В

исследовании использован метод моделирования для построения проектной модели будущего развития территории с учётом экономических, экологических и социальных факторов. Материалами исследования являются:

- документы стратегического развития<sup>6</sup>, в частности: Стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан, Стратегия социально-экономического развития г. Казань и муниципальных районов входящих в состав агломерации
- документы территориального планирования, в частности<sup>7</sup>: Схема территориального планирования (далее СТП) Республики Татарстан, и соответственно СТП муниципальных образований в составе КА,
- общедоступные данные официальной статистики, характеризующие социально-экономическое, территориальное развитие муниципальных образований входящих в состав КА,
- открытые gis-данные.

### 3. Результаты и обсуждение

Казанская агломерация – крупнейшая городская агломерация Республики Татарстан с населением примерно 1,6 млн. человек, имеет моноцентрический характер. Территория КА располагается на северо-западе региона, преимущественно на левом берегу р. Волга. С западной стороны территории граничит с Республикой Марий Эл и Республикой Чувашия. Согласно «Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года», в границы КА входит г. Казань и 5 прилегающих к нему муниципальных районов (Зеленодольский МР, Высокогорский МР, Пестречинский МР, Лайшевский МР, Верхнеуслонский МР), создавая зону активного развития Казанской городской агломерации (рис. 1).

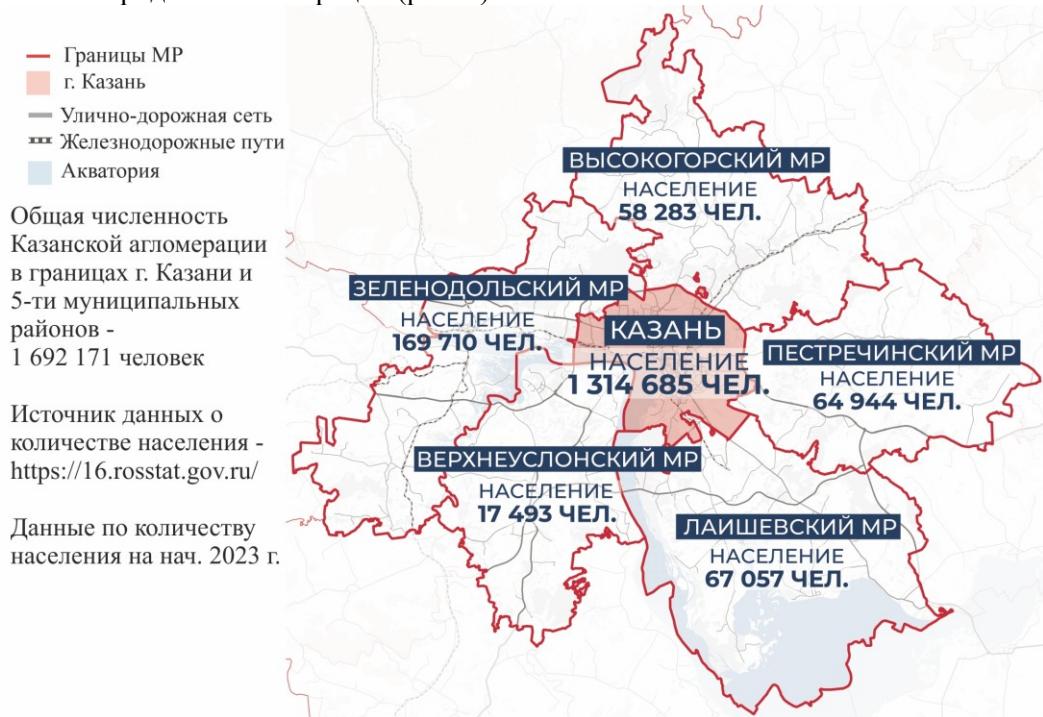


Рис.1. Количество населения Казанской агломерации  
(выполнено автором Мусабировым Т.А.)

Fig. 1. The population size of the Kazan agglomeration (illustration by Musabirov T.A.)

Внутри муниципальных районов находится 3 города: Зеленодольск, Лайшево, Иннополис; пгт Нижние Вязовые, пгт Васильево, а также суммарно 109 сёл, деревень и

<sup>6</sup> Документы стратегического планирования доступны на официальном портале Республики Татарстан. <https://mert.tatarstan.ru/strategicheskoe-planirovaniye.htm>

<sup>7</sup> Документы территориального планирования доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. Источник: <https://fgis-tp.ru/>

сельских поселений. Общая площадь муниципальных границ КА составляет 8364,92 кв. км. Городское население агломерации составляет 87%. Из-за моноцентричности агломерации г. Казань «перетягивает» на себя большинство функционального разнообразия: места приложения труда, центры производственной и деловой активности, объекты торговли), объекты социального, коммунального и финансового обслуживания, места культурного досуга. При этом периферия и остальная часть агломерации испытывают нехватку этих зон. Чем ближе находятся поселения агломерации к его ядру, тем больше они служат «жилым дополнением» г. Казани. Жители спутников вынуждены регулярно совершать интенсивные трудовые и культурно-бытовые поездки – возрастает уровень маятниковой миграции. Снижению высокого уровня маятниковой миграции может послужить переход характера агломерации от моно- к поликентрическому (равномерному распределению мест проживания, приложения труда и отдыха населения). Чтобы начать постепенный переход к поликентричности в первую очередь необходимо выделить сформировавшийся опорный каркас агломерации – совокупность узловых точек и соединяющие их транспортные магистрали. Существующий опорный каркас КА состоит из ряда транспортных связей (железные дороги, федеральная трасса М-7, автодорога федерального значения А-295, автодороги Р-241, Р-239, 16К-0396), транспортных узлов (международный аэропорт им. Г.М. Тукая, речной порт, железнодорожные вокзалы, автовокзалы), ядра агломерации, городов и поселений спутников (рис.2).

## Условные обозначения:

- () – международный аэропорт
- () – ж/д вокзал
- () – речной порт
- () – автовокзал
- магистрали федерального значения
- магистрали регионального значения
- магистрали областного значения
- железнодорожные пути
- — жилые поселения
- — акватория
- границы муниципальных районов
- адм. границы агломерации
- границы субъектов РФ

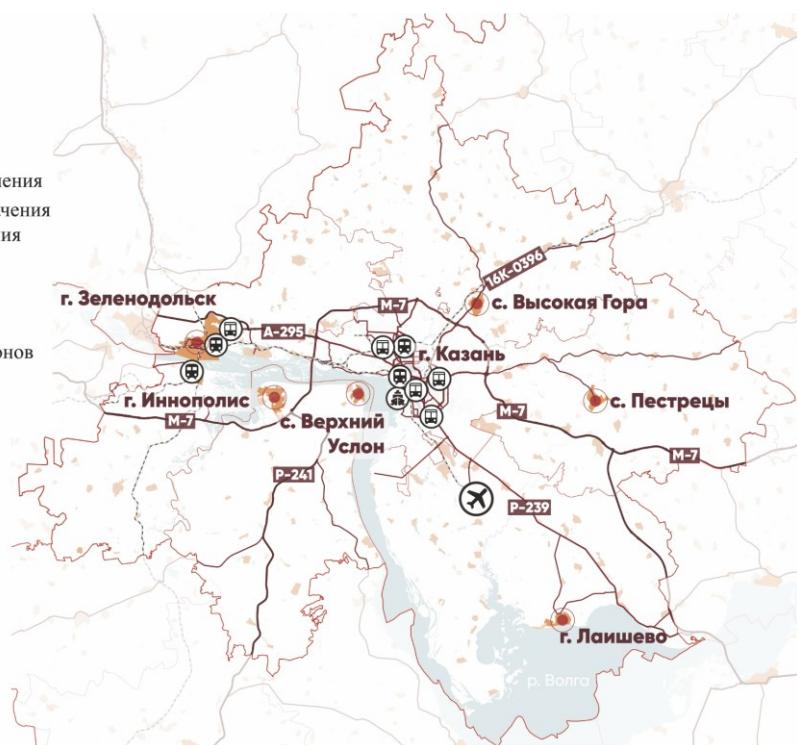


Рис. 2. Опорный каркас Казанской агломерации (выполнено автором Мусабировым Т.А.)  
Fig. 2. The supporting frame of the Kazan agglomeration (illustration by Musabirov T.A.)

При рассмотрении опорного каркаса КА можно выделить ряд его недостатков и барьеров, среди которых:

- наличие водного барьера (р. Волга «разрезает» Зеленодольский МР и отделяет Верхнеуслонский МР от ядра);
- железная дорога протягивается с запада на восток, но не имеет связей с югом и севером агломерации;
- отсутствуют транспортные связи между муниципальными центрами районов, из-за чего поездки между ними совершаются через ядро агломерации и исторический центр Казани;

сильная диспропорция плотности населения (рис.3) и функционального насыщения в ядре агломерации и поселениях-спутниках.

Чтобы начать решение данных проблем необходима разработка мастер-плана КА и выявление ее точек роста.

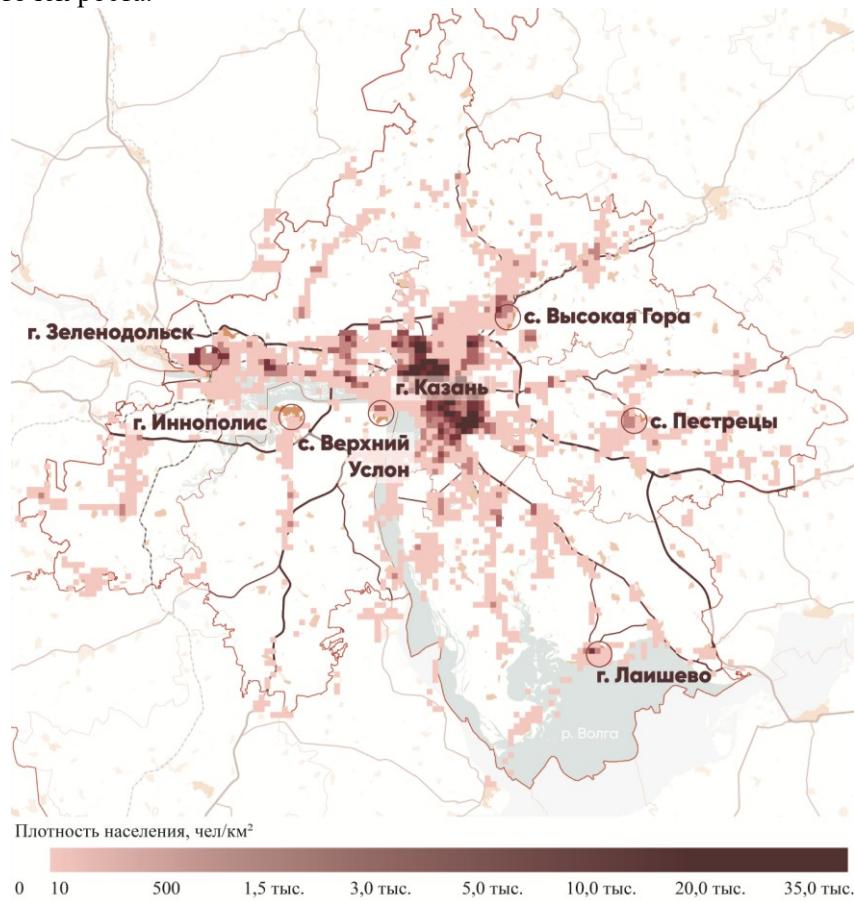


Рис. 3. Плотность населения Казанской агломерации  
(выполнено автором Мусабировым Т.А.)

Fig. 3. Population density of the Kazan agglomeration (illustration by Musabirov T.A.)

**Модель развития Казанской агломерации.** На основе выделенных проблем, карты планируемого размещения линейных объектов транспортной инфраструктуры местного значения г. Казани, чертежа Генерального плана городского округа Казань (карты функциональных зон), схем территориального планирования муниципальных районов, перспективно-развивающихся территорий составлена схема планируемого развития транспортно-коммуникационного каркаса КА, схема планируемого размещения объектов логистики и производственных кластеров (рис.4).

На основе проектной схемы опорного каркаса КА выделены точки роста агломерации. **Точной роста агломерационного значения** является территория, жилое поселение и (или) скопление вблизи располагающихся жилых поселений, находящихся на опорном каркасе агломерации, которые в перспективе могут взять на себя часть функций города-ядра или спутников (рис.5). Развитие данных точек роста позволит «перехватить» на себя часть регулярной миграции населения и «удержать» его в себе. В таких точках должна обеспечиваться концентрация и интеграция городских функций, необходимых населению для покрытия базовых потребностей, а также размещение наиболее важных объектов сервиса и услуг. Здесь же стоит сказать, что для привлечения и удержания населения в данные точки роста необходимо в каждом частном случае работать с уникальностью территории и насыщать ее необходимой инфраструктурой. На основе комплексного анализа КА были выделены точки роста агломерационного значения с высокой численностью населения и высокими темпами освоения территории жилищным строительством.

Условные обозначения:

- – производства различной специализации (в т.ч. на основе которых организуются производственные кластеры)
- – производственные кластеры
- – новые произв. площадки
- – новые логистические центры
- – мостовое сооружение (пр.)
- магистрали (пр.)
- железнодорожные пути (пр.)
- жилые поселения
- акватория
- границы муниц. районов
- адм. границы агломерации
- границы субъектов РФ

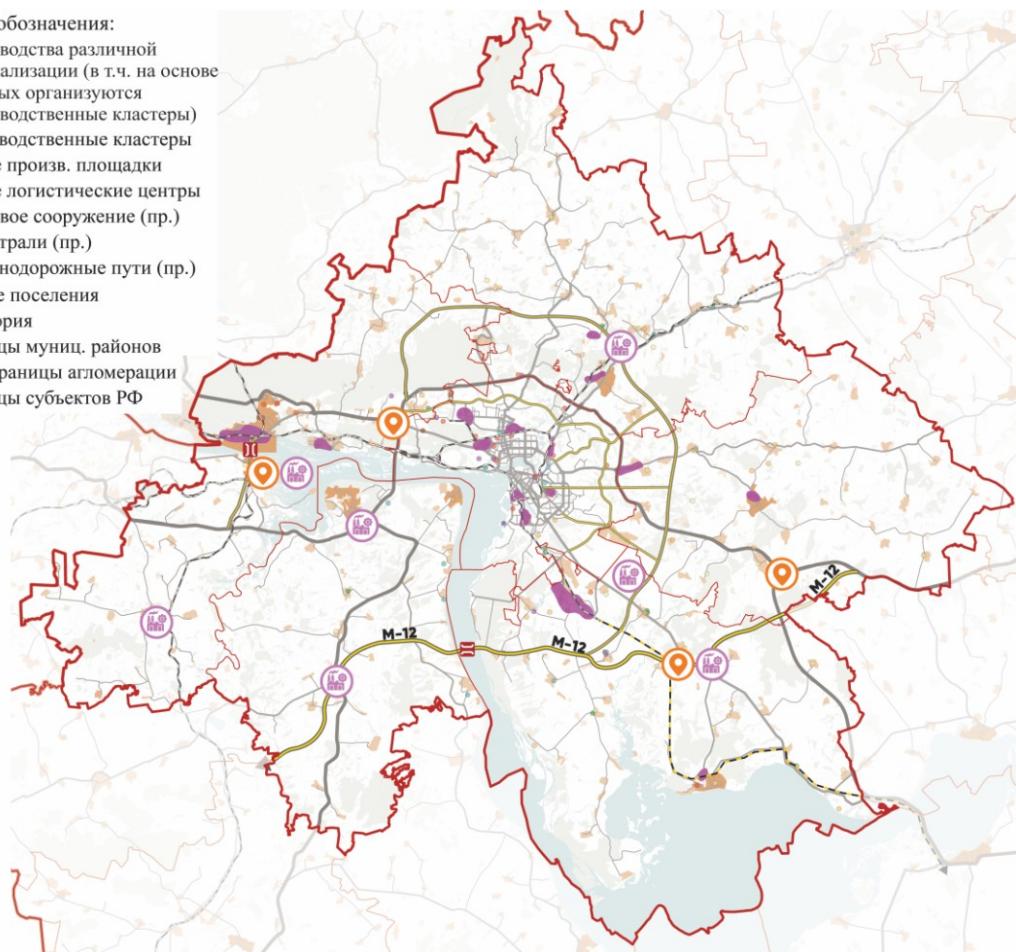


Рис. 4. Схема развития опорного каркаса Казанской агломерации, места размещения новых производственных и логистических центров (выполнено автором Мусабировым Т.А.)

Fig. 4. The scheme of development of the supporting framework of the Kazan agglomeration, the location of new production and logistics centers (illustration by Musabirov T.A.)

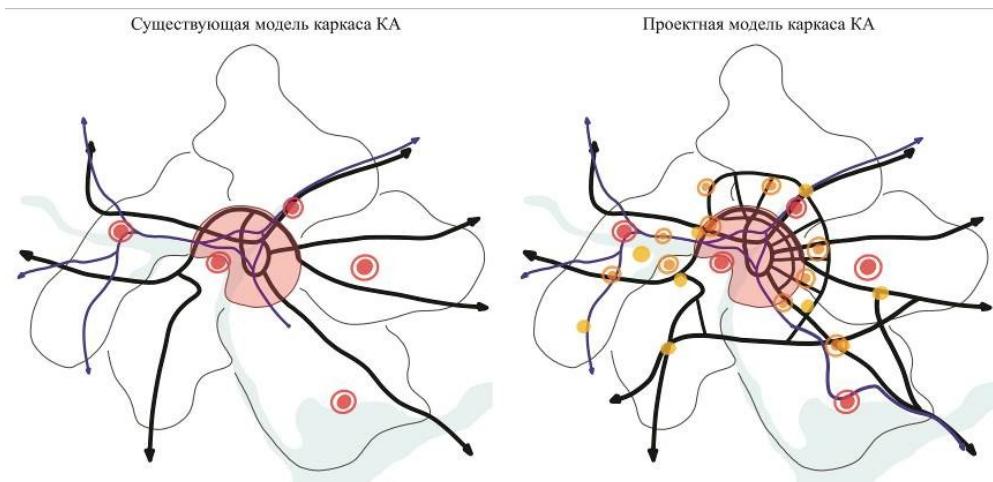


Рис. 5. Планировочная модель Казанской агломерации: существующее положение - проектное предложение (выполнено автором Мусабировым Т.А.)

Fig. 5. The planning model of the Kazan agglomeration: the current situation - the project proposal (illustration by Musabirov T.A.)

Это территории следующих поселений:

- г. Иннополис (Верхнеуслонский МР);
- с. Столбище, с. Усады, с. Малые Кабаны, с. Большие Кабаны (Лайшевский МР);

- д. Куюки, с. Богородское (Пестречинский МР);
- с. Кощаково, д. Царево, с. Новое Шигалеево (Пестречинский МР);
- с. Каймары (Высокогорский МР);
- с. Осиново (Зеленодольский МР);
- пгт Васильево (Зеленодольский МР).

Также, отдельно можно выделить точки роста агломерации второго порядка, т.е. те точки, чья очередьность предполагается на долгосрочную перспективу. Это основано на потенциальном росте численности населения, за счет появления новых производственных и логистических кластеров, и с учетом освоения жилых зон, заложенных в документах территориального планирования (генеральные планы, СТП, проекты планировки территории), а также планируемом развитии транспортно-коммуникационного каркаса агломерации. Это территории следующих поселений:

- с. Большое Ходяшево (Зеленодольский МР);
- с. Большие Ключи, с. Большие Кургузи, с. Малые Кургузи, с. Большие Яки (Зеленодольский МР);
- с. Сокуры, д. Каипы (Лаишевский МР);

При обеспечении агломерационных точек роста необходимой инфраструктурой, они возьмут на себя часть функций города-ядра и спутников, частично снизится уровень культурно-бытовой и рабочей миграции. Проектная модель каркаса КА будет выглядеть следующим образом (рис.6).

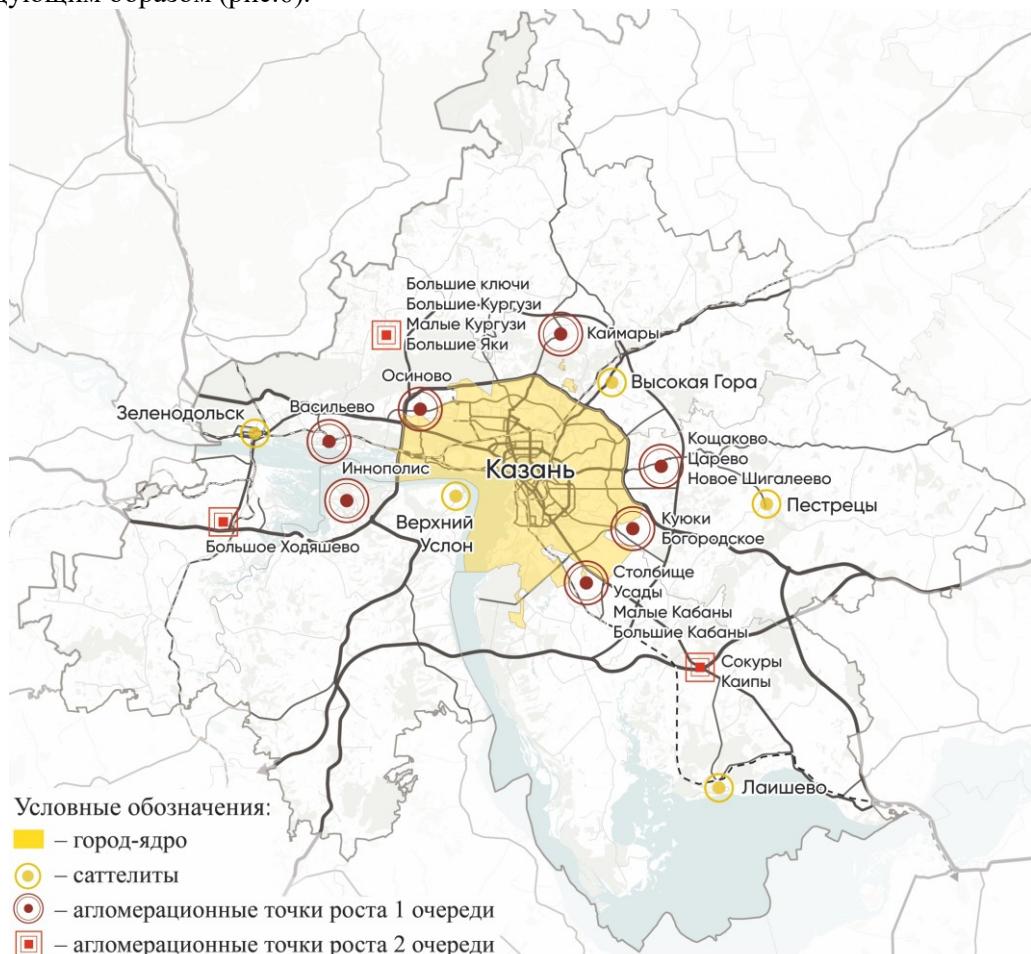


Рис. 6. Точки роста Казанской агломерации, проектное предложение  
(выполнено автором Мусабировым Т.А.)

Fig. 6. Points of growth of the Kazan agglomeration, project proposal  
(illustration by Musabirov T.A.)

Данное исследование соотносится с исследованиями по изучению планировочной структуры Казанской агломерации и предпосылок ее трансформации с целью

устойчивого пространственного, социально-экономического развития [14, 15]. Выработка подобной модели и стратегии пространственного развития будет способствовать скоординированному и более эффективному развитию муниципальных образований, составляющих Казанскую агломерацию, для выявления первоочередных мероприятий и территорий, которые в перспективе окажут общий положительный эффект на экономику региона. Следующим этапом исследования является рассмотрение факторов определяющих точки роста агломерационного значения, их тип, а также более детальным рассмотрением точек роста агломерации разного типа.

#### 4. Заключение

1) В исследовании представлены результаты анализа теоретических исследований в области агломерационного развития. В частности изучены работы по следующим аспектам: история становления теорий в области агломерационного развития, современные подходы, определяющие границы агломерации (делимитация), группа исследований, посвященная определению фаз развития агломерации, а также описанию структуры и каркаса агломерации.

2) В исследовании проведен комплексный анализ Казанской агломерации по следующим аспектам: социально-демографические характеристики, плотность населения, планировочная структура, транспортный каркас и проч. При рассмотрении опорного каркаса КА выделены недостатки и барьеры ее территориального развития.

3) В исследовании сформирована модель трансформации планировочной структуры Казанской агломерации с учетом потенциальных точек роста, что предполагает переход к поликентрической модели. Дано определение «точек роста» агломерационного значения. Для Казанской агломерации выделены точки роста агломерационного значения с высокой численностью населения и высокими темпами освоения территории жилищным строительством, а также точки роста агломерации второго порядка, т.е. те точки, чья очередность предполагается на долгосрочную перспективу.

#### Список литературы / References

1. Власова Н. Ю., Антипин И. А. Городские агломерации: история, современность, стратегические ориентиры // Journal of new economy. 2010. №3 (29). [Vlasova N. YU., Antipin I. A. Urban agglomerations: history, modernity, strategic guidelines // Journal of new economy. 2010. Iss. 3 (29)]
2. Перськова А.Ю., Перськова М.В., Ладик Е.И. Формирование и развитие городских агломераций. Зарубежный и отечественный опыт // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №8. С. 71-84. [Perkova A.YU., Perkova M.V., Ladik E.I. Formation and development of urban agglomerations. Foreign and domestic experience // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. Iss. 8. P. 71-84]
3. Клименко Д. И., Абакумов Р. Г., Авилова И. П. Модели градостроительного развития агломераций как основа социально-экономического развития государства // Инновационная экономика: перспективы развития и перспективы. 2018. №1 (27). [Klimenko D. I., Abakumov R. G., Avilova I. P. Models of urban development of agglomerations as the basis of the socio-economic development of the country // Innovative economics: prospects for development and improvement. 2018. №1 (27)]
4. Меркурев В.В., Мягков Е.В. Развитие агломераций: этапы, отечественные и зарубежные практики // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2022. № 3(71) [Merkurev V.V., Myagkov E.V. Development of agglomerations: stages, domestic and foreign practices // Regional economics and management: electronic scientific journal. 2022. Iss. 3(71)]
5. Lachininsky S. S., Sorokin I. S. Spatial structure and the development of settlements in the Saint Petersburg agglomeration.// Baltic Region. 2021. Vol. 13, Iss. 1. P. 48-69. DOI: 10.5922/2079-8555-2021-1-3
6. Мазаев А. Г. Определение границ агломераций как важная проблема современной градостроительной теории // Академический вестник УралНИИпроект РААСН.

2023. № 1(56). С. 22-26. DOI: 10.25628/UNIIP.2023.56.1.004. [Mazaev A. G. Determining the boundaries of agglomerations as an important problem of modern urban planning theory // Academic bulletin UralNIIproekt RAASN. 2023. Iss. 1(56). P. 22-26]
7. «Методики делимитации городских агломераций», аналитический отчет фонда «Институт экономики города». Москва. 2021 [“Methods for delimiting urban agglomerations”, analytical report of the fund “Institute of Urban Economics”. Moscow. 2021].
  8. Blinkin M. Infrastructure and transportation. Russia: Strategy, Policy and Administration. 2017. P. 195–204. DOI: 10.1057/978-1-37-56671-3\_18
  9. Dembich A., Zakirova Y., Latypova M. Resources and Opportunities for the Functional and Spatial Development of the Kama Agglomeration // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Volume 1079, Iss. 3, P. 032026.
  10. Jun M-J. The effects of polycentric evolution on commute times in a polycentric compact city: A case of the Seoul Metropolitan Area // Cities. 2020. Vol. 98 (102587). DOI: 10.1016/j.cities.2019.102587
  11. Heitz A., Dablanc L., Tavasszy L. A. Logistics sprawl in monocentric and polycentric metropolitan areas: the cases of Paris, France, and the Randstad, the Netherlands // Region. 2017. Vol. 4, Iss. 1. P. 93—107. DOI: 10.18335/region.v4i1.158.
  12. Rastvortseva S. N. An Overview of Investigations Concerning Agglomerations in Regional Economy // Ekonomika regiona [Economy of regions], 2022, 18(2). P. 324-337. DOI:10.17059/ekon.reg.2022-2-2.
  13. Lavrinenko P. A., Romashina A. A., Mikhailova T. N, Chistyakov P. A. Agglomeration effect as a tool of regional development // Studies on Russian Economic Development, 2019. Vol. 30. Iss. 3. P. 268-274. DOI: 10.1134/S1075700719030109.
  14. Закиева Л. Ф., Гарифуллина А. Р. Функционально-планировочное развитие Восточного сектора Казанской агломерации: Материалы 12-й Международной молодежной научной конференции – Молодежь и XXI век / Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 235–238. [Zakieva L. F., Garifullina A. R. Functional and planning development of the Eastern sector of the Kazan agglomeration: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Youth Scientific Conference “Youth and XXI Century” / Kursk: Southwest State University, 2022. P. 235–238.]
  15. Закирова Ю. А., Исмагилова С.Х., Закиева Л.Ф. Функционально-пространственная организация стыковых узлов в планировочной структуре Казанской агломерации // Архитектура и строительство России. 2022. № 2(242). С. 44-49. [Zakirova YU. A., Ismagilova S.H., Zakieva L.F. Functional and spatial organization of joint nodes in the planning structure of the Kazan agglomeration // Architecture and construction of Russia. 2022. Iss. 2(242). P. 44-49]

### Информация об авторах

**Мусабиров Тимур Александрович**, архитектор, МБУ «Институт развития города», г. Казань, Российская Федерация

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

**Закирова Юлия Александровна**, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: [jzakirova@gmail.com](mailto:jzakirova@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0143-2502

### Information about the authors

**Timur A. Musabirov**, architect, City Development Institute, Kazan, Russian Federation

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

**Yuliya A. Zakirova**, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: [jzakirova@gmail.com](mailto:jzakirova@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0143-2502

УДК: 711.435, 728.6

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.15

EDN: NVVMZS



## **Модель «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология» при реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий**

**Е.Е. Портной<sup>1</sup>, И. Г. Малков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Частное-торгово-производственное предприятие «Консул П»,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь

**Аннотация:** *Постановка задачи.* В Республике Беларусь проводятся долгосрочные меры по реабилитации территорий Восточного Полесья после аварии на Чернобыльской АЭС. Перед местными сообществами стоят вопросы опережающего развития, что требует разработки новой системы знаний, эволюцию планировочных подходов и максимальное использование методов архитектуры при реализации реабилитации. Цель работы разработать новую архитектурную модель на основе двух предпосылок обеспечения безопасности населения и роста его благополучия. *Задачами исследования* является выделение предпосылок для изменения мировоззрения как архитекторов, так и других лиц, принимающих решения по дальнейшему развитию района, а также разработка новых подходов при проектировании на территориях, подверженных радиоактивному загрязнению

**Результаты.** Разработана модель архитектурно-планировочной реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий, в которой описаны предпосылки для реализации, подходы по проектированию, примеры связи с другими уже существующими моделями для системности при проведении мероприятия.

**Выводы.** Новая модель безопасной реинтеграции территории упрощает проведение социальных изменений, поиск архитектурных решений для территорий с особыми экологичными требованиями.

**Ключевые слова:** Архитектурно-планировочная реабилитации, Восточное Полесье, авария на Чернобыльской АЭС

**Для цитирования:** Портной Е.Е., Малков И.Г. Модель «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология» при реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 170-179, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.15, EDN: NVVMZS

## **The model "Safe reintegration of territories – a new ideology" in the rehabilitation of territories contaminated with radionuclides**

**E.Y. Partny<sup>1</sup>, I.G. Malkov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Private trade and production unitary enterprise "Consul P",

<sup>2</sup>Belarusian State University of Transport,  
Gomel, Republic of Belarus

**Abstract:** *Problem statement.* The Republic of Belarus is taking long-term measures to rehabilitate the territories of Eastern Polesie after the Chernobyl accident. Local communities face issues of advanced development, which requires the development of a new knowledge

system, the evolution of planning approaches and the maximum use of architectural methods in the implementation of rehabilitation. *The purpose of the work is* to develop a new architectural model based on two prerequisites for ensuring the safety of the population and the growth of its well-being. *The objectives of the study are* to identify the prerequisites for changing the worldview of both architects and other decision makers on the further development of the district and the development of new approaches in the design of areas subject to radioactive contamination.

*Results.* A model of architectural and planning rehabilitation of territories contaminated with radionuclides has been developed, which describes the prerequisites for implementation, design approaches, and examples of connection with other existing models for consistency during the event.

*Conclusions.* The new model of safe reintegration of the territory simplifies the implementation of social changes, the search for architectural solutions for territories with special environmental requirements.

**Keywords:** Architectural and planning rehabilitation, Eastern Polesie, the accident at the Chernobyl nuclear power plant

**For citation:** Partny E.Y., Malkov I.G. The model "Safe reintegration of territories – a new ideology" in the rehabilitation of territories contaminated with radionuclides // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 170-179, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.15, EDN: NVVMZS

## 1. Введение

После крупнейшей техногенной аварии прошло более трёх десятилетий, мероприятие по устранению её результатов продолжаются в Беларуси и в других странах. Урон, нанесённый экономике загрязнённых территорий, продолжает подрывать потенциал населённых пунктов и делает, по истечении времени, их депрессивными и дотационными. Современные исследователи экономического ущерба выделяют общие мероприятия, как наиболее эффективные при проведении реабилитации [1]. Так как проблема загрязнения радионуклидами является долгосрочной и «невидимой» для невооружённого глаза, то предпочтение при решении необходимо отдавать методам, позволяющим изменять пространство и эффект от которых будет воздействовать не один год. Такими свойствами обладают различные архитектурные объекты. Создавая архитектурно-планировочную модель необходимо рассмотреть понятийный аппарат для исключения ментальных ошибок при создании стратегии реабилитации.

Объектом исследования является историческая область Восточного Полесья, располагается она в Гомельской области, Республика Беларусь. На территории области в зоне радиоактивного загрязнения на момент аварии оказалось 12 городских населённых пунктов и 1188 сельских [2]. Согласно карте прогнозных показателей и фактическим результатам мониторинга загрязнения территорий цезием-137, плотность его снижается, что связано с физическими свойствами радионуклида и проводимыми мероприятиями (внесение сельскохозяйственных удобрений и т.д.) [3]. Количество населенных пунктов на загрязненной территории сократилось в 1,5 раза, а число проживающего там населения - 1,9 раза [4]. Также снижается биологическая доступность дозообразующего излучения через сельскохозяйственную продукцию [5,6].

Многие мероприятия при относительно низких уровнях загрязнения теряют экономический смысл: эвакуация, дезактивация, временное переселение и т.д. Концепция радиационного риска предполагает учитывать потенциальный вред от радиоактивного излучения, однако избыточные меры, направленные сохранение здоровья, могут принести обратный результат из-за возникновения социального напряжения, связанного с уменьшением дохода, потери связи с родными местами (при эвакуации), отъезда молодого поколения в поисках лучшей жизни, что приводит к ухудшению психо-эмоционального состояния и значительно ухудшает качество жизни [7] и усугубляет проблему суицидов и употребления алкогольных напитков [8], понижает качество жизни. Происходит тенденция к утрате потенциала развития территорий и

экономической активности. Подобные имиджевые проблемы ухудшают инвестиционную привлекательность района, а нахождение точек роста делает сложной задачей.

Изучением проблемы реабилитации пострадавших регионов занимается ряд научных институтов, большая часть исследований относится к медицинской, агрохимической, лесохозяйственной и экономической области. Возможности влияния на качество жизни со стороны архитектуры рассматриваются мало и не системно [9]. При этом объекты архитектуры обладают большим влиянием на психическое состояние жителей, экономику и раскрытие потенциала местности [10-11].

Опыт последней аварии, связанной с крупной утечкой радиоактивных элементов на АЭС «Фукусима-1» и последующих восстановительных работ показывает, что развитие экономики государства не может быть полноценным без всеобъемлющей реинтеграции пострадавших районов, причём цель заключается в создании условий в опережающем развитии [12]. Создание моделей для опережающего социально-экономического развития территорий, пострадавших от радиоактивного загрязнения, требует дифференцированного подхода для каждого конкретного района, чтобы комплекс мер по архитектурно-планировочной реабилитации наиболее полно раскрыл потенциал района. Таким образом, стремление к безопасности и качественной жизни становится основой нового мировоззрения, в широком смысле – идеологией.

Целью исследования является создание модели архитектурно-планировочной реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология».

Задачами исследования являются:

- Проработка терминов, относящихся к модели;
- Исследование возможностей архитектурно-планировочной реабилитации;
- Анализ необходимых мировоззренческих изменений;
- Выработка новых подходов архитектурного проектирования исходя из модели.

## 2. Материалы и методы

Исследование проводилось на основании анализа предшествующих научных материалов, публикуемых в открытых источниках как белорусских, так и иностранных авторов. Для натурного обследования и фотофиксации городских и межселенных пространств были сделаны выезды в одни из самых пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС районы Гомельской области: Ветковский, Чечерский, Брагинский и Наровлянский. Был проведён анализ мероприятий, проводимых при реабилитации загрязнённых территорий, отразившихся на пространстве и архитектуре городов. Использовался сравнительно-исторический метод при анализе подходов к проведению реабилитации территорий Гомельской области и региона Тохоку (Япония) с повышенным ионизирующим излучением. Для оценки социально-экономического потенциала и поиска точек роста для пострадавших районов использовалась методика, разработанная Институтом экономики НАН Беларуси [13].

Были учтены архитектурно-экологические особенности местности и закономерности её восстановления. Подготовка понятийного аппарата осуществлялась, основываясь на нормативной базе Республики Беларусь и научной литературе по радиационной и ядерной безопасности, архитектуре, психологии и социологии. В соответствии с целью статьи, была представлена модель для удобного её практического применения в виде таблицы, описывая как существующий контекст, так и новый.

## 3. Результаты и обсуждение

В районах, которые были подвержены загрязнению радионуклидов после аварии на Чернобыльской АЭС, наблюдается такие социальные и психологические процессы, как депопуляция, депрессия, радиофобия и стресс радиоэкологический. Это приводит к уменьшению социальной и экономической активности, уменьшению доли занятого в хозяйственной деятельности населения. Меры поддержки, оказываемые государством, не могут, в полном объеме, решить проблему активизации устойчивого роста местных сообществ. На данном этапе постановочных мероприятий наибольший «видимый» эффект может дать, только архитектурно-планировочная реабилитация.

Были подвергнуты анализу районы, находящиеся в одном историческом (большинство бывшие местечки), культурном (примерно один национальный состав населения), политическом поле (исследования затрагивают одну страну, унификация статистических данных, единый подход к поставаийному воздействию). Некоторые компоненты не столь репрезентативны, такие как научно-инновационный потенциал, ведь в 2019 году 11 районов занимали общую последнюю 11 позицию. Возможность графического отображения изменения показателей в рейтинге позволяет найти точки роста и обозначить проблемы [13]. Подобный подход соответствует национальной стратегии устойчивого развития до 2035 года в области обеспечения экологической безопасности среды проживания и обеспечению устойчивого социально-экономического развития загрязненных территорий без ограничения хозяйственной деятельности по радиационному фактору [14].

На примере диаграммы изменения компонентов (использования социально-экономического потенциала) Ветковского района можно проанализировать, что необходима деятельность по развитию ряда составляющих: трудовой и человеческий потенциал, потенциал экономического развития, наращивание внешнеторгового и инвестиционного потенциала (рис. 1). Подобное многофакторное развитие требует единой стратегии по архитектурно-планировочной реабилитации района.

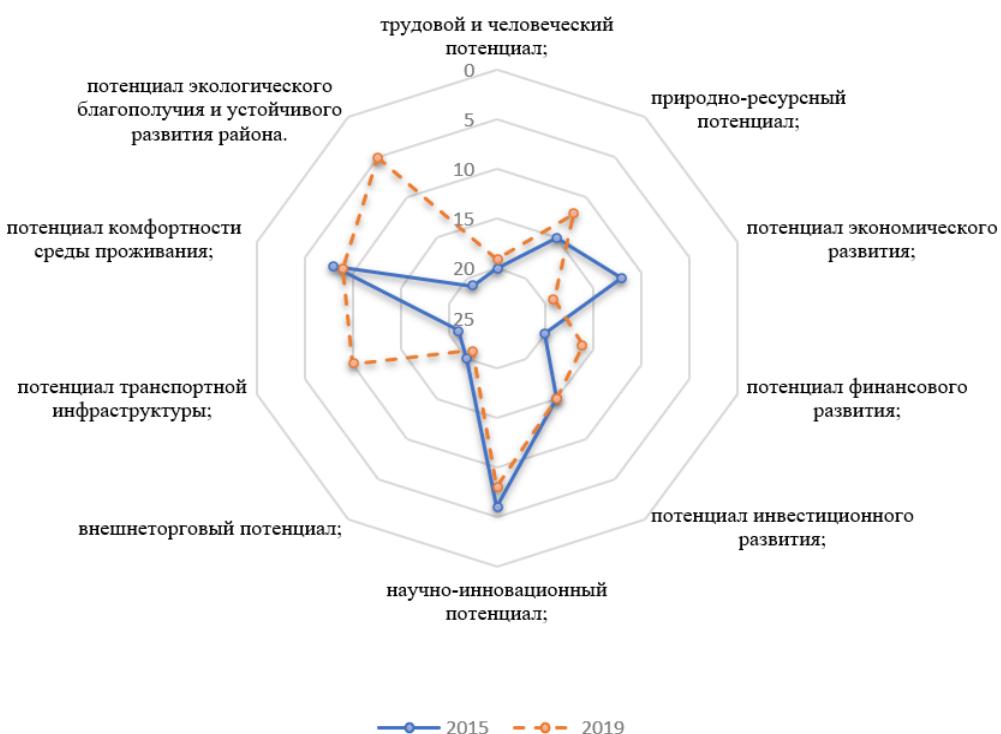


Рис. 1. Диаграмма компонентов (сводного индекса использованного потенциала) в Ветковском районе, Гомельской области за 2015 и 2019 г. (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Diagram of components (composite index of used potential) in Vetkovsky district, Gomel region for 2015 and 2019. (illustration by the authors)

Для исключения путаницы были выделены следующие термины: архитектурно-планировочная реабилитация загрязнённых радионуклидами территорий, радиационная безопасность, радиофобия, стресс радиоэкологический и депопуляция.

Архитектурно-планировочная реабилитация загрязнённых радионуклидами территорий – это процесс переустройства местности средствами архитектуры, позволяющий воспроизводить безопасную среду для устойчивого развития местного сообщества [15].

Идеология безопасности – система идей о важности безопасного существования человека и окружающей среды, создании условий для сохранения жизни и здоровья граждан от воздействия внешней среды, в том числе после чрезвычайных ситуаций.

Реинтеграция территорий – процесс полноценного возврата в хозяйственную деятельность территорий, ранее изъятых или ограниченных в использовании по экологическим причинам.

Устойчивое развитие – процесс экологически рациональных социально-экономических изменений для повышения качества жизни населения.

Радиационная безопасность – комплекс мероприятий, направленный на защиту здоровья человека, в том числе и психологического, выпускаемой продукции, объектов окружающей природной и социальной среды от вредного воздействия ионизирующих излучений.

Радиофобия – навязчивое неадекватное переживание страхов, возникающих в ситуации массового радиоактивного облучения и отсутствия оперативной и достоверной информации о реальной степени радиологического риска и его возможных последствиях для здоровья человека.

Стресс радиоэкологический – эмоционально отрицательное психологическое состояние индивида, возникшее в ситуации реальной или мнимой угрозы состоянию здоровья и даже жизни человека вследствие экстремального воздействия на него радиологических, экологических и психологических стрессоров.

Депопуляция – уменьшение абсолютной численности населения какой-либо страны или территории, либо сужение его воспроизводства (превышение смертности над рождаемостью). Депопуляция в ряде случаев сопровождается ухудшением возрастной структуры населения.

Многие психологические процессы, такие как радиофобия и стресс радиоэкологический, имеют скрытый, неосознаваемый характер прохождения, однако он имеет значительное влияние при выборе стратегии личного развития, принятия решения о долгосрочном изменении места жительства. Изменение идеологии развития выражается в редактировании контекста и необходимых подходов при архитектурном проектировании табл. 1.

Таблица 1

Модель архитектурно-планировочной реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология»



При реализации модели необходимо уделять особое внимание психологической безопасности и возможности её поддерживать через среду, в которой живёт индивид. Вероятность успеха реализации архитектурно-планировочной реабилитации повышается, если при создании новой стратегии развития района учитывается изменение в контексте реинтеграции.

В отличии от крупных индустриальных центров, нуждающихся в изменениях в связи с переходом к постиндустриальному образу жизни, районные центры Восточного Полесья находятся на другом этапе развития, где возможно продолжение развития как промышленных предприятий, так и раскрытие потенциала глубокой переработки продукции аграрного профиля, что положительно скажется на безопасности выпускаемой продукции. В настоящий момент специализация районов квалифицируется аграрным и аграрно-промышленным типом. Для обеспечения низкой себестоимости продукции, и использования земель с более низким уровнем ионизирующего загрязнения и обеспечения автономности работы, необходимо использовать не только объекты альтернативной энергетики, но и создавать жилищную базу для работников, прибывших из других регионов. Различные схемы блокирования позволяют за счёт использования минимальных архитектурных средств добиться выразительности и запоминающегося образа, без потери рационального подхода к инвестициям. Предложения по объёмно-пространственной компоновке представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Предложения по объёмно-пространственной компоновке и интеграции  
растениеводческих предприятий закрытого грунта с жильём и объектами альтернативной  
энергетики

Площадь территории, м <sup>2</sup>	Степень интеграции растениеводческих предприятий закрытого грунта с жильём и объектами альтернативной энергетики			
	Отдельное размещение	Блокирование		
		Через соединительный коридор	Горизонтальное соединение	Комбинирован- ное
До 100				
До 500				
До 1000				

Окончание таблицы 2

До 2000					
Более 2000					

■ - Постройки жилого назначения  
■ - Помещения теплиц  
■ - Помещения технического назначения  
● - Объекты альтернативной энергетики

После выезда и анализа районных центров было сделано наблюдение – местное население, в связи с эвакуацией из сельских населённых пунктов, было вынуждено стать городскими жителями, что привело к явным социальным изменениям, которые подтверждаются социологическими исследованиями [16]. Потеря не только от родных мест (дома, природные локации, кладбища), но и привычного образа жизни, связанного с обладанием своего участка земли, сделала старую мировоззренческую систему неактуальной и усилила дезадаптационные процессы. А для создания условий реинтеграции территорий необходимо создать условия для возврата, возможно символического, связи с природой и землёй. Подобные проекты могут быть связаны со снижением этажности при строительстве новых микрорайонов, увеличение реального озеленения на 15-20 %, активное развитие «городское фермерство», строительство таунхаусов, интеграция индивидуального жилья и тепличных хозяйств. Строительство таунхаусов возможно силами местных строительных организаций, что поддержит малый бизнес и сохранит для людей привычный образ жизни.



Рис. 2. Таунхаусы построенные ОАО «Гомельский ДСК» в г. Гомель, пер. Бакунина, 29.  
(илюстрация авторов)

Fig. 2. Townhouses built by JSC Gomelsky DSK in Gomel, Bakunin Lane, 29 (illustration by the authors)

Неорганизованная природа при пересмотре функционала использования пространств не является «заброшенной», а позволяет задействовать инструменты ландшафтной архитектуры, расширить биоразнообразие внутри города, не только флоры, но и фауны. Создание подобных мест рекреации требует изменения подхода к благоустройству, условно «свободная» природа позволит горожанам легче переносить стресс и повысит качество их жизни. Сделать природу ближе можно различными путями, примером может стать устройство специальных «мест созерцания» на берегу рек, где оборудуются специальные «наблюдательные пункты», которые помогают создать

комфортную атмосферу для отдыха и созерцания птиц. Публичные пространства, созданные подобным образом, становятся центром экологического просвещения для молодого поколения и местом для выставки объектов современного искусства. [17,18]

Важность борьбы с «чересполосицей» (точечным загрязнением, где в рамках одной местности степень ионизирующего загрязнения может кратно изменяться) за счёт использования тепличных комплексов различной мощности привлекательна тем, что инвестиции, которые необходимо затратить на разработку земли, рациональны по сравнению с разработкой под обычные, для этой местности, виды земледелия. Интеграция жилого комплекса и производства сокращает транспортные затраты и делает рабочие места более привлекательными для работников.

Создание и описание моделей по архитектурно-планировочной реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий позволит организовать целостную систему знаний, на основании которых будут разработаны принципы и рекомендации по проведению реабилитации территории. Подобные рекомендации должны быть осуществимы, понятны широким массам, затрагивать интересы исполнительных властей, инвесторов и населения, так как требуют изменения мировоззрения.

#### **4. Заключение**

Как показало проведённое исследование по созданию модели «Безопасная реинтеграция территорий – новая идеология», работу по организации безопасной среды необходимо разделить на следующие части: безопасности физическую, психологическую и выпускаемой продукции. Возможности архитектуры для реабилитации территорий не использованы в полной мере в настоящий момент. Данная работа направлена на изменение мировоззрения населения и лиц, принимающих решения об возможности качественной и безопасной жизни на территории, пострадавшей от аварии на ЧАЭС.

Предлагаются следующие подходы при проектировании:

1. Изменение стратегии по использованию пространства согласно стратегии устойчивого развития;
2. Формирование открытых природных пространств с композиционно-неорганизованной природой, что окажет положительный эффект на психологическое здоровье населения и снизит тревожность;
3. Трансформация исторических центров для создания точек роста и туристической привлекательности;
4. При производстве аграрной продукции повсеместное использование закрытого грунта создаст высокопроизводительные рабочие места.

На межселенных и сельских территориях предлагается использовать интеграцию растениеводческих предприятий закрытого грунта с жильём и объектами альтернативной энергетики, для полноценного возврата ранее выведенных из хозяйственной деятельности земель. Совместное использование объектов альтернативной энергетики и растениеводческих предприятий закрытого грунта не только решает вопрос реализации произведённой электроэнергии, но и даёт возможности создать запоминающийся художественный образ.

Создание моделей архитектурно-планировочной реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий сочетается с единым подходом и принципом превентивности региональной политики Республики Беларусь. Изменение имиджа района, на безопасный и развивающийся, позволит улучшить демографическую ситуацию, увеличить туристический поток и обеспечить многовекторное развитие.

#### **Список литературы/References**

1. Арон Д. В. Методы анализа эффективности дезактивации территории префектуры Фукусима (Япония) // Статистика и Экономика, 2017. № 3. С. 114-124. DOI 10.21686/2500-3925-2017-3-114-124. [Aron D. V. Methods of analyzing the effectiveness of decontamination of the territory of Fukushima Prefecture (Japan) // Statistics and Economics. 2017. No. 3. P. 114-124.]
2. Социально-радиационный паспорт Гомельская область URL: [https://mchs.gov.by/upload/iblock/a80/pasport\\_gomelskaya-oblast-2018.pdf](https://mchs.gov.by/upload/iblock/a80/pasport_gomelskaya-oblast-2018.pdf) (дата

- обращения: 23.02.2024) [Social and radiation passport Gomel region URL: [https://mchs.gov.by/upload/iblock/a80/pasport\\_gomelskaya-oblast-2018.pdf](https://mchs.gov.by/upload/iblock/a80/pasport_gomelskaya-oblast-2018.pdf) (reference date: 02/23/2024)]
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларусь. М. : Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Минск : Белкартография, 2009. С. 140 : ил., карт. [Atlas of current and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus. M. : Infosphere – NIA – Nature Foundation, Minsk : Belkartografiya, 2009. 140 p.: ill., maps.]
  4. Цыбулько Н.Н. Радиационная защита населения Беларуси: национальный опыт и международные рекомендации: Международная научная конференция, Гомель, 24–25 сентября 2015 года / Институт радиологии. Гомель. 2015. С. 274. [Tsybulko N.N. Radiation protection of the population of Belarus: national experience and international recommendations: International Scientific Conference, Gomel, September 24-25, 2015 / Institute of Radiology. Gomel. 2015. 274 p.]
  5. Седукова Г. В., Демидович С.А. Возделывание однолетних бобово-злаковых смесей на загрязнённых радионуклидами территориях // Зернобобовые и крупяные культуры. 2012. № 4(4). С. 83-86. [Sedukova G. V., Demidovich S.A. Cultivation of annual legume-cereal mixtures in territories contaminated with radionuclides // Legumes and cereals, 2012. No. 4(4). P. 83-86.]
  6. Борисевич Н. Я. От реабилитации к устойчивому развитию территорий, пострадавших от чернобыльской катастрофы // Социологический альманах, 2018. № 9. С. 409-415. [Borisevich N. Ya. From rehabilitation to sustainable development of territories affected by the Chernobyl disaster // Sociological Almanac, 2018. No. 9. P. 409-415.]
  7. Бабосов Е. М. Социальные последствия Чернобыльской катастрофы, пути их преодоления: [монография]. Минск: БТН-информ. 2001. С. 220 [Babosov E. M. Social consequences of the Chernobyl disaster, ways to overcome them: [monograph]. Minsk: BTN-inform. 2001. 220 p.]
  8. Разводовский Ю. Е., Дукурский В.В. Социально-эпидемиологические корреляты суицида в Хойникском районе Гомельской области // Проблемы здоровья и экологии, 2009. № 2(20). С. 143-147. [Razvodovsky Yu. E., Dukorsky V.V. Socio-epidemiological correlates of suicide in the Khoiniksky district of the Gomel region // Problems of health and ecology, 2009. No. 2(20). P. 143-147.]
  9. Малков И. Г. О некоторых особенностях проектирования и проживания в населенных пунктах в условиях радиационного загрязнения // Проектирование и строительство зданий на транспорте: Межвузовский сборник научных трудов / Белорусский государственный университет транспорта. Гомель, 1994. С. 66-69. [Malkov I. G. On some features of designing and living in settlements in conditions of radiation pollution // Design and construction of buildings in transport: Interuniversity collection of scientific papers / Belarusian State University of Transport. Gomel, 1994. P. 66-69.]
  10. Костронь Л. Психология архитектуры . Харьков.: изд-во «Гуманитарный Центр». 2018. С. 340 [Kostron L. Psychology of architecture. Kharkov: publishing house "Humanitarian Center". 2018. 340 p.]
  11. Степанов А. В., Иванова Г.И., Нечаев Н.Н. Архитектура и психология. М.: Стройиздат. 1993. С. 295. [Stepanov A.V., Ivanova G.I., Nechaev N.N. Architecture and psychology. M.: Stroyizdat. 1993. 295 p.]
  12. Алексахин Р. М., Сычев В.Г. Радиоэкологические аспекты реабилитации сельского хозяйства после аварии на АЭС "Фукусима Даичи" // Плодородие, 2013. № 4(73). С. 2-6. [Aleksakhin R. M., Sychev V.G. Radioecological aspects of agricultural rehabilitation after the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant // Fertility, 2013. No. 4(73). P. 2-6.]
  13. Методические рекомендации по оценке уровня экономического потенциала пострадавших от аварии на ЧАЭС районов Республики Беларусь. Минск:

Институт системных исследований в АПК НАН Беларусь, 2022. С. 67 [Methodological recommendations for assessing the level of economic potential of the areas of the Republic of Belarus affected by the Chernobyl accident. Minsk: Institute of System Research in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022. 67 p.]

14. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года // economy.gov.by - Министерство экономики Республики Беларусь URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> (дата обращения: 02.05.2024) [National Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus until 2035 // economy.gov.by - Ministry of Economy of the Republic of Belarus URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> (reference date: 05.05.2024)]
15. Портной Е. Е. Архитектурно-планировочная реабилитация загрязнённых радионуклидами территорий: Трансформация информационно-коммуникативной среды общества в условиях вызовов современности: материалы II Международной научно-практич. конф. молодых учёных / Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Комсомольск-на-Амуре, 2023. Ч.3. С. 329-332. [Partny E. Y. Architectural and planning rehabilitation of territories contaminated with radionuclides: Transformation of the information and communication environment of society in the context of modern challenges: materials of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists / Komsomolsk-on-Amur State University. Komsomolsk-on-Amur, 2023. Part 3. P. 329-332.]
16. Борисевич Н. Я. От реабилитации к устойчивому развитию территорий, пострадавших от чернобыльской катастрофы // Социологический альманах. 2018. № 9. С. 409-415. [Borisevich N. Ya. From rehabilitation to sustainable development of territories affected by the Chernobyl disaster // Sociological Almanac. 2018. No. 9. P. 409-415.]
17. Закирова А. М., Осипова В.Ю. Экологические проблемы строительной отрасли и пути их решения // Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии. 2023. Т. 1, № 1. С. 65-70. [Zakirova A.M., Osipova V.Yu. Ecological problems of the construction industry and ways to solve them // Heritage of V.I. Vernadsky and modern problems of ecology. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 65-70.]
18. Галиева Э. А., Зверко М.Т., Гилязетдинов Т.А. Постнефтяная эпоха малых городов республики Татарстан: ревитализация промышленных территорий города Альметьевска // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. 2023. № 2(2). С. 151-160. [Galieva E. A., Zverko M.T., Gilyazetdinov T.A. Post-oil era of small towns of the Republic of Tatarstan: revitalization of industrial territories of the city of Almetevsk // Architecture. Restoration. Design. Urbanistics. 2023. No. 2(2). P. 151-160.]

#### Информация об авторах

**Портной Евгений Ефимович**, главный инженер, частное торгово-производственное унитарное предприятие «Консул П», г. Гомель, Республика Беларусь  
*E-mail: portnoy.e@yandex.ru*

**Малков Игорь Георгиевич**, доктор архитектуры, профессор, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь  
*E-mail: apgs@bsut.by*

#### Information about the authors

**Eugene Y.Partny**, Chief Engineer, private trade and production unitary enterprise "Consul P", Gomel, Republic of Belarus  
*Email: portnoy.e@yandex.ru*

**Igor G. Malkov**, doctor of architecture, professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus  
*Email: apgs@bsut.by*

**УДК:** 711.5:930**DOI:** 10.48612/NewsKSUAE/68.16**EDN:** PACTWX

## Особенности редевелопмента промышленных и коммунальных зон города Альметьевск

**П.С. Хафизов<sup>1</sup>, Ю.А. Закирова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ООО Архитектурно-инженерная компания «Реновация»<sup>2</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки стратегии пространственного развития в области редевелопмента промышленных зон г. Альметьевск, при этом отсутствуют федеральные и региональные программы по перепрофилированию или модернизации индустриальных территорий. Нерациональное использование земельных ресурсов характерно для многих крупных городов, когда значительные городские территории заняты объектами промышленности, что порождает ряд проблем экономического и социального характера: высокий уровень загрязнения окружающей среды, перегрузка транспортной инфраструктуры, пониженный уровень дохода бюджетной сферы от недоиспользования потенциала городских земель. Цель исследования – выявление особенностей редевелопмента коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск, выработка градостроительных рекомендаций по реорганизации крупных фрагментов городских территорий. Задачи исследования: провести комплексный градостроительный анализ г. Альметьевск, определить специфику и особенности реорганизации коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск, определить направления градостроительных преобразований юго-восточной промышленной зоны в г. Альметьевск.

**Результаты.** Основные результаты исследования состоят в том, что проведен комплексный градостроительный анализ коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск, выявлена их типология, определена специфика и особенности реорганизации юго-восточной промышленной зоны в г. Альметьевск.

**Выводы.** Значимость полученных результатов для архитектуры и градостроительства состоит в том, что впервые разработаны градостроительные подходы по реорганизации коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск, определены их функционально планировочные особенности и разработана их типология.

**Ключевые слова:** редевелопмент, реорганизация, браундфилд, промышленные и коммунальные зоны, Альметьевск

**Для цитирования:** Хафизов П.С., Закирова Ю.А. Особенности редевелопмента промышленных и коммунальных зон города Альметьевск // Известия КГАСУ, 2024, №2 (68), с. 180-192, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.16, EDN: PACTWX

## Features of the redevelopment of industrial and communal areas of the city of Almetyevsk

P.S. Khafizov<sup>1</sup>, Y.A. Zakirova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC Architectural and engineering company “Renovation”,

<sup>2</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The relevance of the study is due to the need to develop a spatial development strategy in the field of redevelopment of industrial zones in Almetyevsk, while there are no federal and regional programs for the redevelopment or modernization of industrial territories. Irrational use of land resources is typical for many large cities, when significant urban areas are occupied by industrial facilities, which causes a number of economic and social problems: high levels of environmental pollution, transport infrastructure overloading, low level of public sector income from underutilization of urban land potential. The purpose of the study is to identify the features of the redevelopment of communal, warehouse and industrial zones of the city of Almetyevsk, to develop urban planning recommendations for the reorganization of large fragments of urban areas. Research objectives are to conduct a comprehensive urban planning analysis of Almetyevsk, to determine the specifics and features of the reorganization of communal, warehouse and industrial zones of the city of Almetyevsk, to determine the directions of urban planning transformations of the southeastern industrial zone in Almetyevsk.

**Results.** The main results of the study are that a comprehensive urban planning analysis of communal, warehouse and industrial zones of the city of Almetyevsk was carried out, their typology was revealed, the specifics and features of the reorganization of the south-eastern industrial zone in Almetyevsk were determined.

**Conclusions.** The significance of the results obtained for architecture and urban planning lies in the fact that urban planning approaches for the reorganization of communal, warehouse and industrial zones of the city of Almetyevsk were developed for the first time, their functional planning features were determined and their typology was developed.

**Keywords:** redevelopment, reorganization, brownfield, industrial and communal areas, Almetyevsk

**For citation:** Khafizov P. S., Zakirova Yu. A. Features of the redevelopment of industrial and communal areas of the city of Almetyevsk //News KSUAE, 2024, №2 (68), p. 180-192, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.16, EDN: PACTWX

### 1. Введение

В настоящее время во многих крупных городах России активно протекают процессы редевелопмента промышленных и коммунальных зон. Это связано с изменением экономического уклада города, сменой градообразующих функций города, переосмыслением роли тяжелого производства в экономике городов. Ведущие градостроительные концепции, такие как «глобальные города», «зеленые города», «устойчивые города» так или иначе, формулируют направления определяющие, описывающие развитие промышленности, основанные на мировом градостроительном опыте [1].

Редевелопмент — это процесс преобразования устаревших или незастроенных промышленных зон с целью создания новых функциональных, экологически устойчивых и инновационных мест. Он включает изменение земельного использования, инфраструктуры, архитектурных решений и социокультурных элементов [2, 3].

Идеи редевелопмента возникли в период индустриализации, когда в крупных городах образовались территории с высокой концентрацией заводов и фабрик. В XX веке предприятия «грязных отраслей» начали закрываться, что привело к необходимости развития постиндустриальной экономики и сервисных услуг. Редевелопмент промышленных территорий стал одним из эффективных способов решения проблемы

нехватки места для застройки [3, 4]. Один из самых известных и успешных примеров редевелопмента — это реконструкция здания бывшего сахарного завода в районе DUMBO в Бруклине, Нью-Йорк<sup>1</sup>. Архитектурное бюро ODA превратило историческое промышленное здание, построенное в 1898 году, в офисный комплекс с блестящим стеклянным фасадом<sup>2</sup>. Этот проект позволил сохранить и преобразовать здание, представляющее архитектурную и историческую ценность, в современное пространство для офисов. Также необходимо отметить масштабное строительство в Лондоне, Копенгагене и других европейских городах, где под редевелопмент пошли промышленные зоны и преобразование бывших аэропортов, например, в Вене, где строится район Зеештадт с жилыми и коммерческими объектами вокруг озера<sup>3</sup>.

В российских городах наиболее явно и активно процессы редевелопмента протекают в крупнейших и крупных городах. Редевелопмент рассматривается как вынужденная мера из-за отсутствия свободных земельных участков в центре российских городов. Так, актуальность редевелопмента для Москвы и Санкт-Петербурга связана с увеличением численности жителей, необходимостью поиска внутренних резервов города для более эффективного использования (для строительства жилья и общественной застройки) и расположением старых промышленных зон вокруг центральных частей городов [2, 5]. Так, например, Московский стройкомплекс отмечает, что 17% территории «старой» Москвы приходится на бывшие промзоны<sup>4</sup>. В отечественной градостроительной практике формируется тренд на равномерное распределение функционала между жилым и рабочим пространством (по 45%) и составление 10% для объектов инфраструктуры и сохранение наследия индустриальной эпохи и адаптация исторических зданий к новой жизни. Крупнейший проект реорганизации промзоны в России и Европе — ревитализация ЗИЛа<sup>5</sup>, где планируется построить 6,4 млн. м<sup>2</sup> недвижимости различного назначения [5, 6].

В работах и исследованиях в области редевелопмента часто встречается понятие браунфилд. *Браунфилд* (от англ. brownfield) — это территория с промышленной застройкой, которая используется в иных целях. Браунфилд-проекты противопоставляются гринфилд-проектам (строительство «в чистом поле») [7]. Примеры развития браунфилдов:

- преобразование старого промышленного завода в офисный комплекс;
- реконструкция заброшенной железнодорожной станции в жилой комплекс;
- переделка старой гавани в торговый центр [7, 8].

Также в контексте социально-экономического и территориального планирования городов и работы с промышленными и коммунально-складскими территориями все чаще встречается термин *реиндустириализация*. Реиндустриализация в городе — это процесс возвращения промышленности в город с новыми характеристиками и функциями, которые обеспечивают устойчивое развитие городского хозяйственного комплекса. Это может включать формирование и развитие промышленных кластеров, диверсификацию промышленного развития, модернизацию предприятий и поддержку малого и среднего предпринимательства [9]. Примером реиндустриализации является создание технополиса «Москва» на территории бывшего завода «Москвич», где разместились производства фармацевтических препаратов, композитов и микроэлектроники<sup>6</sup>.

<sup>1</sup> Фролова Н. Сахарные кристаллы. Источник: <https://archi.ru/world/85348/sakharnye-kristally>

<sup>2</sup> Сачалин О. Новая жизнь промзоны Москвы. Редевелопмент от Oda-Architecture. Источник: [https://www.architime.ru/news/oda/mazd\\_moscow.htm#1.jpg](https://www.architime.ru/news/oda/mazd_moscow.htm#1.jpg)

<sup>3</sup> Горелова Д. Деревянный рай. Источник: <https://archi.ru/world/87720/derevyannyi-rai>

<sup>4</sup> Официальный сайт мэра Москвы. 150 промышленных зон Москвы ждет реорганизация. Источник: <https://www.mos.ru/news/item/83948073/>.

<sup>5</sup> Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. Промзона «ЗИЛ». Источник: <https://stroi.mos.ru/construction/2213>.

<sup>6</sup> Официальный сайт мэра Москвы. 150 промышленных зон Москвы ждет реорганизация. Источник: <https://www.mos.ru/news/item/83948073/>.

Процесс редевелопмента сложный, многоуровневый и включает множество факторов. Так, например, можно выделить следующие факторы, определяющие процесс редевелопмента (табл. 1.):

Таблица 1

## Факторы процесса редевелопмента

Градостроительные факторы	«запуск» в активное городское использование ранее «неэффективных» территорий, имеющих неудобное местоположение или характеризующиеся отсутствием необходимой транспортной инфраструктурой (общественным транспортом), появление новых жилых районов, в жилые, коммерческих или рекреационных зон, повышение качества городской среды;
Экономико-правовые факторы	рост и развитие промышленных предприятий, банкротство, смена формы собственности, изменение цены и налогообложения земельных участков, применение механизмов комплексного развития территории (КРТ);
Социальные факторы	необходимость преобразований в рамках новых социальных программ и улучшение условий труда, изменение специализации рабочих мест, замещение рабочих мест одной сферы на другую;
Экологические факторы	переход на экологически безвредное производство и использование ресурсосберегающих технологий;
Историко-культурные факторы	реконструкция исторических зданий и изменение роли промышленных предприятий в историческом центре города;
Заданные факторы	перепрофилирование предприятий в случае чрезвычайных ситуаций и проведение мероприятий по защите от стихийных бедствий;
Эстетические факторы	улучшение внешнего облика промышленных зданий и их соответствие окружающей застройке;
Технологические факторы	развитие технологий, модернизация производства, автоматизация и роботизация.

Таким образом, редевелопмент производственных зон, предполагающий изменение промышленной функции на иные, становится инструментом ревитализации городских районов и создания в них комфортной городской среды. Редевелопмент меняет планировочную структуру города, меняет городскую экосистему, облик и наполнение городских территорий. Он приводит к джентрификации, привлечению жителей с более высоким уровнем дохода и бизнеса, что меняет (увеличивает) цены на недвижимость. В целом городское сообщество выигрывает от этого процесса, так как старые промышленные объекты преобразуются в современные офисы, магазины, мастерские, спортивные залы и другие объекты, способствующие здоровому экономическому и социальному развитию районов.

Цель исследования – выявление особенностей редевелопмента коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск.

Задачи исследования:

- 1) провести комплексный градостроительный анализ г. Альметьевск,
- 2) определить специфику и особенности реорганизации коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск;

3) определить направления градостроительных преобразований юго-восточной промышленной зоны в г. Альметьевск.

## 2. Материалы и методы

Методика исследования основана на комплексном анализе градостроительной теории и практики редевелопмента городских территорий. В исследовании применены методы исторического анализа, изучение картографических, проектных и нормативных документов. Также проведен социологический анализ (опрос) направленный на изучение особенностей развития торговой недвижимости, рынка развлечений и спорта, туристического потенциала города, жилой недвижимости в г. Альметьевск. Также в ходе исследования проведено натурное обследование промышленных и коммунально-складских территорий г. Альметьевск, входящих в границы исследования, что позволило изучить особенности территории, её функциональное назначение, существующие объекты и определить перспективные направления развития.

Материалами исследования являлись:

- документы стратегического планирования<sup>7</sup>: Стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан, Стратегия социально-экономического развития Альметьевского муниципального района;
- документы территориального планирования<sup>8</sup>: Схема территориального планирования Альметьевского района, Генеральный план г. Альметьевск;
- данные статистики, характеризующие социально-экономическое и территориальное развитие г. Альметьевск и Альметьевского района;
- открытые gis-данные, а также сведения, полученные в ходе натурных исследований.

## 3. Результаты и обсуждение

**Комплексный градостроительный анализ планировочной структуры г. Альметьевск.** Альметьевск – административный центр Альметьевского района, самый крупный город в Альметьевской агломерации и четвертый по численности город Татарстана. Альметьевск является центром Альметьевской экономической зоны, выделенной в Республике Татарстан согласно «Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года». Население агломерации составляет около 500 тыс. чел., а с поселком Джалиль Сармановского района и поселениями Бавлинского и Ютазинского районов – 540 тыс. чел. [10].

Альметьевск был основан в XVIII веке. Точных данных о времени основания деревни Альметьево не сохранилось, но ряд косвенных свидетельств указывает на рубеж второго-третьего десятилетий XVIII века<sup>9</sup> [11]. Агломерация начала формироваться в середине XX века в связи с открытием и освоением на юго-востоке Республики Татарстан второго по величине в стране Ромашкинского нефтяного месторождения [12]. Первоначально регион формировался из поселений, обслуживающих места нефтедобычи. И сегодня экономика района основана на добыче и переработке нефти. На 2023 год население Альметьевска составляет 164145 чел<sup>10</sup>. Площадь города составляет 10214,6 га. Жилищная обеспеченность на 2023 г. составляет 29,2 кв. м на человека.<sup>11</sup>

Основные градообразующие предприятия, подразделения компании «Татнефть», дополняются сервисными предприятиями. Кроме того, в районе действует ряд

<sup>7</sup> Документы стратегического планирования доступны на официальном портале Республики Татарстан. Источник: <https://mert.tatarstan.ru/strategicheskoe-planirovaniye.htm>

<sup>8</sup> Документы территориального планирования доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. Источник: <https://fgis-tp.ru/>

<sup>9</sup> Мустафин М.Р., Хузеев Р.Г. Все о Татарстане (Экономико-географический справочник). Казань: Татарское кн. изд-во, 1994. 164 с.

<sup>10</sup> Согласно данным Федеральной службы государственной статистики. Источник: <https://rosstat.gov.ru/>

<sup>11</sup> Согласно данным размещенным на официальном портале Альметьевского района и г. Альметьевск Республики Татарстан. Источник: <https://almeteyevsk.tatarstan.ru/index.htm>

промышленных площадок для размещения малых частных производств. Современный Альметьевск характеризуется высоким уровнем социально-экономического развития. Основные показатели г. Альметьевск и Альметьевского района включают<sup>4</sup>:

- за январь-ноябрь 2023 года среднемесячная заработка работников крупных и средних предприятий Альметьевского района составила 78 437,4 рублей;
- уровень безработицы на 1 января 2024г. составил 0,13% от численности рабочей силы 111 тыс. 300 чел.;
- на 2023 г. на долю района приходится более 30% промышленного производства республики Татарстан;
- на 2023 г. действуют шесть аккредитованных промышленных парков, где работают 48 резидентов, создано 535 рабочих мест;
- на 2023 г. численность занятых в сегменте малого и среднего предпринимательства составила 35,4 тыс. человек – на 10% больше, чем в 2022 году. Наблюдается рост числа субъектов малого и среднего бизнеса. В 2023 году их количество увеличилось на 22% по сравнению с 2022г.;
- за 2022 г. рост валового регионального продукта (ВРП) на 6 %, промышленного производства – на 6,6 %, продукции сельского хозяйства – на 25,6 %, объема строительных работ – на 20,0 %; добыча 35,7 млн. тонн нефти в Татарстане, в том числе ПАО «Татнефть» – 28,6 млн. тонн, малыми компаниями – 7,1 млн. тонн.

Одной из основных проблем пространственно-территориального, развития города – это дефицит территориальных резервов пригодных для жилищного строительства, что связано с планировочными ограничениями обусловленные зонами с особыми условиями использования территории связанных с нефтедобычей и производством, с природными факторами, инженерно-геологическим процессами, наличием скотомогильников и проч. (согласно материалам Генерального плана г. Альметьевск). В таблице 2 представлен существующий баланс функциональных зон г. Альметьевск.

Таблица 2

## Баланс территории (существующее положение)

Наименование показателя	площадь функциональных зон	
	га	%
<b>Территория в границах г. Альметьевск</b>	<b>10214,6</b>	<b>100,0</b>
Территории жилой застройки, из них:	1010,7	9,9
– секционная застройка	327,9	3,2
– блокированная застройка	25,1	0,2
– усадебная застройка	657,7	6,4
Общественно-деловые территории	134,9	1,3
Производственные территории	902,2	8,8
Территории инженерной и транспортной инфраструктур	1273,2	12,5
Рекреационные территории	1375,8	13,5
Территории сельскохозяйственного использования	5234,0	51,2
Территории специального назначения, в том числе:	92,0	0,9
– озеленение специального назначения	-	-
Иные территории	191,8	1,9

Также можно отметить, что значительная часть территории г. Альметьевск занята негородскими функциями (на территории города зарегистрировано 67 садовых обществ). Данные территории в настоящее время не могут рассматриваться как резерв жилищное строительство, поскольку значительная их часть перекрывается санитарно-защитными зонами предприятий.

### **Анализ коммунально-складских и промышленных зон города Альметьевск.**

Крупными промышленными предприятиями в городе являются:

– Трубный завод АТЗ. Крупнейшее российское производственное предприятие, относится к трубным заводам «Большой восьмерки».

– Чулочная фабрика «Алсу». Фабрика является одним из крупнейших производителей чулочно-носочных изделий в России.

Часть промышленных предприятий находится в стагнации и не используется на полную мощность. Исходя из функционального зонирования города, можно отметить, что расположение коммунально-складских и промышленных предприятий приходится на южную часть города, и является своеобразным «серым пятном», также дополняется дискретным размещением небольших по площади промышленных и коммунально-складских зон в других районах города (рис.1). Около 10% от общей площади города приходится на коммунально-складские и промышленные функции.



Рис. 1. Схема современного использования территории (материалы Генерального плана г. Альметьевск<sup>12</sup>) с вынесением размещения промышленных и коммунально-складских зон на территории г. Альметьевск (выполнено автором Хафизовым П.С.)

Fig. 1. The scheme of modern use of the territory (materials of the General Plan of Almeteyevsk) with the indication of the location of industrial and communal storage areas on the territory of Almeteyevsk (illustration by P.S. Khafizov)

В южной части Альметьевского района проходит железнодорожная линия, которая объединяет расположенные вблизи Альметьевска поселения городского типа. Часть железнодорожных путей заходят на территории промышленных предприятий города. Территории реорганизуемых производственных зон представляют существенный ресурс для формирования многофункциональных пространств, размещения социально-значимых объектов, повышения пешеходной и транспортной связанности территорий, создания современных общественных пространств, в т. ч. рекреационных [13, 14], при сохранении, выявлении средовой идентичности бывших промышленных и коммунально-складских территорий [15].

<sup>12</sup> Документы территориального планирования доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования. Источник: <https://fgis-tp.ru/>

В результате комплексного градостроительного анализа промышленных и коммунально-складских территорий города было выявлено 3 типа промышленных и коммунально-складских зон (табл. 3, рис. 2):

Таблица 3

Типология промышленных и коммунально-складских зон г. Альметьевск

Тип зоны	Проектные действия
тип 1 – зона, в которой производственная и коммунально-складская функция сохраняются;	Модернизация промышленных предприятий, сокращение санитарно-защитных зон путем усовершенствования оборудования и повышения класса предприятия. Использование современных, «зеленых» технологий.
тип 2 – зона, в которой производственная и коммунально-складская функция сохраняются частично, с возможным выявлением территорий под иные функции;	Редевелопмент производственной зоны с частичным высвобождением ее территории под жилищное, культурно-бытовое строительство, озеленение а также внедрением деловых и обслуживающих функций, создание общественных центров, новые места приложения труда.
тип 3 – зона, в которой производственная и коммунально-складская функция заменяются полностью.	Редевелопмент производственной зоны с полной заменой функции территории. Полный снос всех строений или сохранение и приспособление под новые нужды существующих на территории строений.

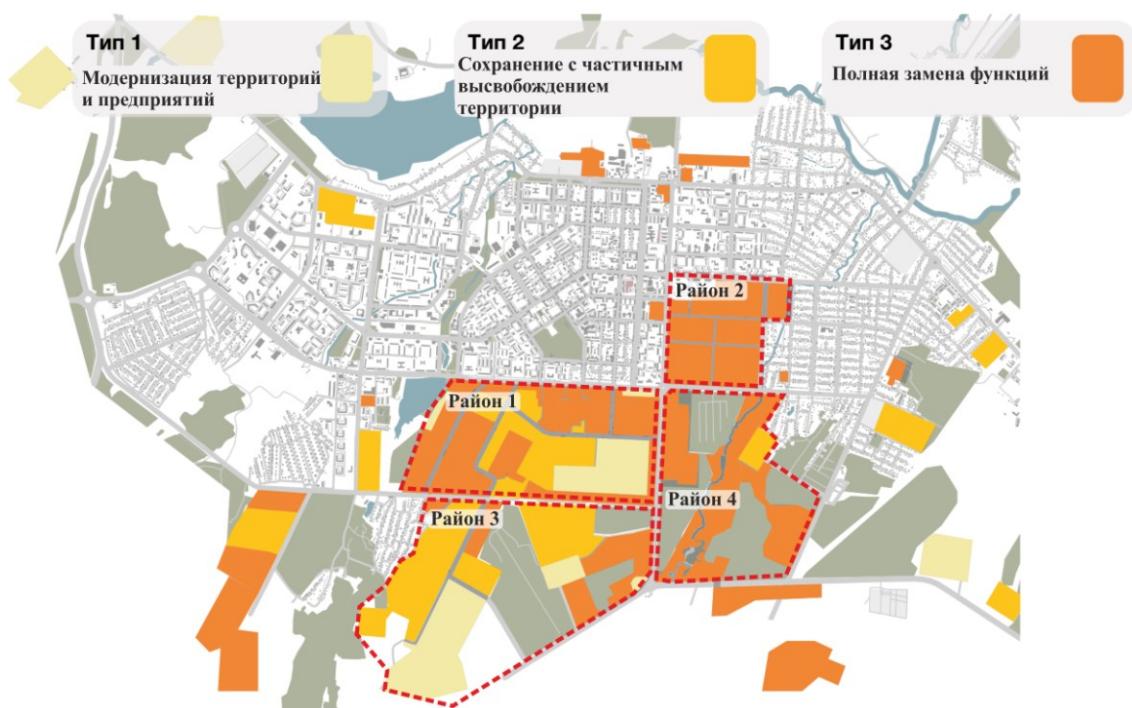


Рис. 2. Схема размещения промышленных и коммунально-складских зон на территории г. Альметьевск (выполнено автором Хафизовым П.С.)

Fig. 2. The layout of industrial and communal storage areas on the territory of Almeteyevsk (illustration by P.S. Khafizov)

### Анализ юго-восточной промышленной зоны

Юго-восточная промышленная зона – это территория, ограниченная с севера ул. Шевченко, на юге границей муниципального образования, с запада гаражами, производственно-складскими территориями, городским озером, с востока садовыми

товариществами и ул. Объездная. Общая площадь ориентировано составляет 11,5 кв.км. На территории есть все 3 типа зон представленных в табл. 3. Также территория планировочного района улично-дорожной сетью (ул. Ризы Фахретдина, ул. Объездная и автомобильной дорогой федерального значения Р239) делится на 3 промышленно-коммунальных района (рис. 2):

- Район 1: ограничен с севера ул. Шевченко, основным центром города, красными линиями жилых районов; с запада - ул. Булгар, гаражами, производственно-складскими территориями, городским озером; с юга ул. Защитников Отечества, производственно-складскими территориями, садовыми товариществами, с востока ул. Ризы Фахретдина;
- Район 2: ограничен с севера ул. Герцена, с юга ул. Тухватуллина, с запада ул. Ризы Фахретдина, на востоке ул. Заводская;
- Район 3: ограничен с севера ул. Защитников Отечества, с юга автомобильной дорогой федерального значения Р239, с запада садовыми товариществами, на востоке ул. Ризы Фахретдина;
- Район 4: ограничен с севера ул. Шевченко, с юга автомобильной дорогой федерального значения Р239, с запада ул. Ризы Фахретдина, на востоке граничит с садовыми товариществами.

Общие направления стратегии редевелопмента юго-восточной промышленной зоны в г. Альметьевск представлены в таблице 4.

Таблица 4

КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ РЕДЕВЕЛОПМЕНТА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ ГОРОДА АЛЬМЕТЬЕВСК						
1. Создание связей территории с центральным районом города	2. Повышение транспортной доступности территории	3. Создание новых центров притяжения на территории	4. Создание новых жилых районов на территории	5. Экологическая устойчивость	6. Создание «нового лица», образа города	7. Поэтапный подход к преобразованиям

В настоящее время в рамках работы с отдельными земельными участками началось преобразование Района 1. Именно это территория обозначена в исследовании как первая очередь градостроительных преобразований и рассмотрена детальнее. Общая площадь рассматриваемого участка составляет 2,8 кв. км. На территории (рис. 3) находится Альметьевский трубный завод. Также с данной территории граничит ландшафтно-парковый объект (озеро, каскад прудов), в шаговой доступности находится парк «60-летия нефти Татарстана». Бизнесом территория осваивается ситуативно, вдоль основных проходящих дорог. Функциональное назначение площадок малого бизнеса на данной территории представлено автосервисными предприятиями (23 шт.). Территория характеризуется удобным расположением и близостью территории к ключевым местам, обеспечена рабочими местами на крупном действующим промышленном предприятии, также есть в настоящий момент свободные от застройки территории. Вместе с тем в качестве отрицательных характеристик территории можно привести ее закрытость и изолированность от городской застройки жилого и общественного назначения, ее образ – как «серый», «неухоженный», а такжеmonoфункциональная направленность промплощадок и малого и среднего бизнеса.

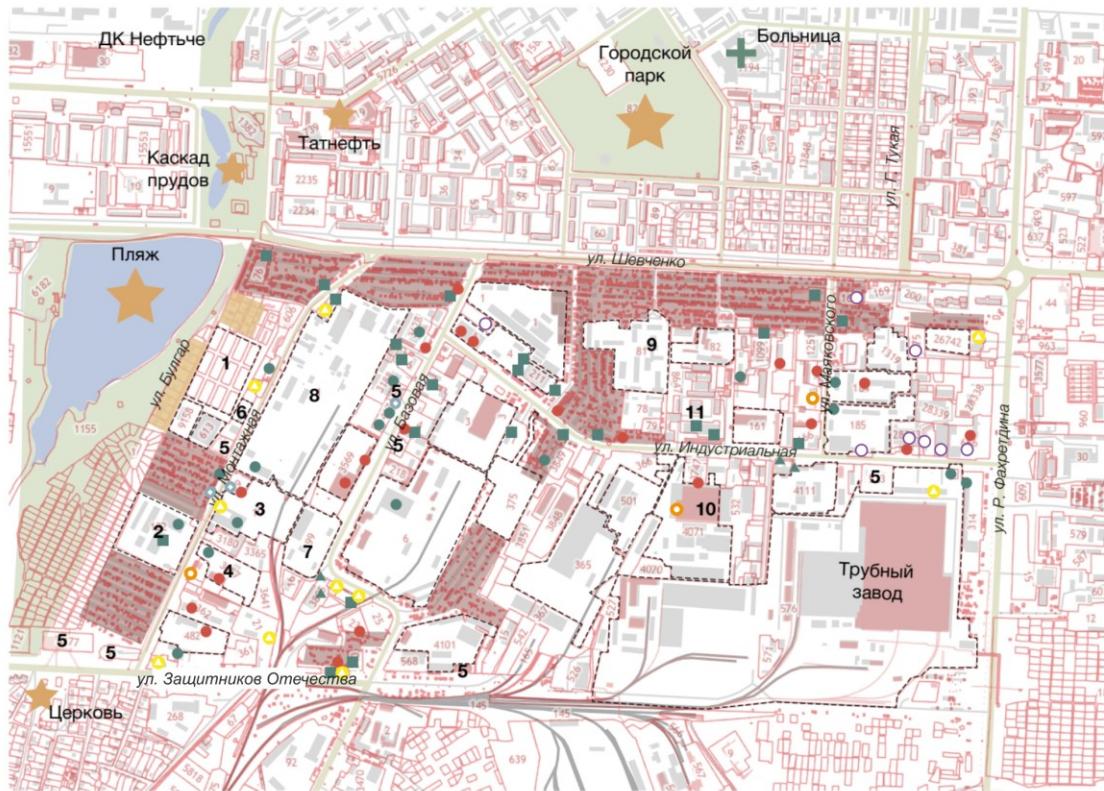
Процесс редевелопмента данного района, создание здесь зоны многофункциональной смешанной застройки позволит его потенциал в территориальном развитии города. Проектной концепцией предлагается размещение на территории: жилой застройки – 69,7 га; общественно-деловой застройки – 39,3 га; деловой застройки – 31,7 га; промышленных территорий - 75 га; рекреационных пространств – 23,4 га; медицинского центра – 11,6 га.

В концепции сформированы следующие подходы к редевелопменту данной территории:

1. Работа в мелкоячеистой сетке с учетом кадастрового деления земельных участков. Работа с большим количеством собственников.
2. Кластерный подход в работе с промышленными площадками. Развитие новых предприятий. Комплексность и специализация промышленных площадок

3. Внедрение предприятий производства 2.0. с минимальным влиянием на окружающую среду

4. Сохранение индустриальной идентичности среды, которая проявляется с местной топонимикой, дизайном среды, материалами, архитектурно-стилистическими приемами в жилой и общественной застройке.



#### Условные обозначения:

- коммунально-складская зона
- автоориентированное предприятие
- автосервисное предприятие (23 шт.)
- ▲ автомойка (6 шт.)
- деревообрабатывающее предприятие (3 шт.)
- металлообрабатывающее предприятие (22 шт.)
- стройматериалы (3 шт.)
- объекты общественного питания (10 шт.)
- объекты нефтегазовой промышленности (8 шт.)

#### Экспликация:

- 1 - строящийся жилой комплекс,
- 2 - Акмаль авто (промплощадка)
- 3 - Бугульм. ЭТУС
- 4 - СтромТех (промплощадка)
- 5 - АЗС,
- 6 - ТатЛом (металлобабатывающее предприятие),
- 7 - Керамзитный завод,
- 8 - Завод ЖБИ,
- 9 - Электроподстанция,
- 10 - Ремонтаж сервис.

Рис. 3. Опорный план части юго-восточной промышленной зоны в г. Альметьевск  
(выполнено автором Хафизовым П.С.)

Fig. 3. The basic plan of a part of the south-eastern industrial zone in Almetyevsk  
(illustration by P.S. Khafizov)

Редевелопмент данной территории будет способствовать формированию полицентричности города, снижению неравномерности размещения объектов сферы обслуживания, уменьшению вынужденных перемещений жителей, обеспечивая в итоге разнообразие городской жизни и повышение жизнестойкости города.

Данное исследование соотносится с исследованиями по изучению и преобразованию промышленных и коммунально-складских зон, которые в настоящее время проводятся для отечественных и зарубежных городов и учитывает принципы редевелопмента промышленных и коммунальных городов с ресурсной экономикой [5, 14]:

1. Устойчивое использование ресурсов: редевелопмент должен учитывать устойчивое использование природных ресурсов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

2. Диверсификация экономики: преобразование и развитие новых отраслей экономики включая инновационные, экологически чистые технологии и услуги, помимо традиционной промышленности.

3. Повышение качества жизни: редевелопмент должен учитывать улучшение условий проживания и благосостояния населения, обеспечивая социальную защищенность, хорошо развитую инфраструктуру и доступ к образованию и здравоохранению.

4. Сохранение объектов промышленного наследия: некоторые исторические промышленные объекты могут быть сохранены и преобразованы в целях сохранения культурного наследия.

5. Получение максимальной отдачи от ресурсов: редевелопмент должен быть направлен на максимальное использование ресурсов и создание рабочих мест в целях стимулирования экономического роста и устойчивого развития.

6. Публичное участие: процесс редевелопмента должен включать широкую общественность, учитывая мнения и интересы жителей, а также обеспечивать их участие в принятии решений.

Эти принципы способствуют созданию устойчивых и жизнеспособных городских сред, способствующих развитию ресурсной экономики и улучшению качества жизни.

Следующим этапом исследования является выработка стратегий пространственного развития других районов юго-восточной промышленной зоны г. Альметьевск, рассмотрение возможностей применения и уточнения границ для применения «механизма комплексного развития территории».

#### 4. Заключение

1. В исследовании проведен комплексный градостроительный анализ г. Альметьевск. Отмечены высокие показатели в области социально-экономического развития г. Альметьевск и Альметьевского района. В области пространственно-территориального определены следующие проблемы: отсутствие резервных территорий в границах города подходящих для строительства жилой застройки или общественных объектов (что обусловлено планировочными ограничениями), значительная часть территории города занята негородскими функциями (сады), часть промышленных предприятий находится в стагнации и не используется на полную мощность.

2. В исследовании определена специфика и особенности реорганизации коммунально-складских и промышленных зон г. Альметьевск. Выявлено 3 типа промышленных и коммунально-складских зон: 1) зона, в которой производственная и коммунально-складская функция сохраняются, 2) зона, в которой производственная и коммунально-складская функция сохраняются частично, с возможным выявлением территорий под иные функции, 3) зона, в которой производственная и коммунально-складская функция заменяются полностью. Определены проектные действия для каждой зоны.

3. Определены ключевые направления стратегии редевелопмента юго-восточной промышленной зоны г. Альметьевск: 1) создание связей территории с центральным районом города; 2) повышение транспортной доступности территории; 3) создание новых центров притяжения на территории; 4) создание новых жилых районов на территории; 5) экологическая устойчивость; 6) создание «нового лица», образа города; 7) поэтапный подход к преобразованиям. Юго-восточная промышленная зона планировочно делится на 4 района. Определен район первой очереди градостроительных преобразований и сформированы подходы к его редевелопменту: работа в мелкоячеистой сетке с учетом кадастрового деления земельных участков; работа с большим количеством собственников; кластерный подход в работе с промышленными площадками, развитие новых предприятий; комплексность и специализация промышленных площадок; внедрение предприятий производства 2.0 с минимальным влиянием на окружающую среду; сохранение индустриальной идентичности среды.

**Список литературы / References**

1. Khalimon E.A., Vikhadtseva E.A., Obradovic V. (2021). Smart cities today and tomorrow - World experience // «Smart Technologies» for Society, State and Economy. ISC 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. V. 155 / ed. by E.G. Popkova, B.S. Sergi. Cham, Springer. P. 1340-1347. DOI: 10.1007/978-3-030-59126-7\_147
2. Георгиевский С. А., Грицан О. Е., Гужов С. А., Тютчева Н. Г., Хрусталева М. А. Москва RE: промышленная. Типология производственных территорий и лучшие практики редевелопмента // Агентство стратегического развития «ЦЕНТР». Москва. 2018. 191 с. [Georgievskij S. A., Grican O. E., Guzhov S. A., Tuytcheva N. G, Hrustaleva M. A. Moscow RE: industrial. Typology of industrial territories and best practices of redevelopment // Strategic Development Agency "CENTER". Moscow. 2018. 191 p.]
3. Власова М. Ф., Леонова Л. Б. Редевелопмент индустриальных зон крупных городов для создания комфортной городской среды в России // Экономика строительства. 2021. №5 (71). [Vlasova M. F., Leonova L. B. Redevelopment of industrial zones of large cities to create a comfortable urban environment in Russia // Construction Economics. 2021. №5 (71).]
4. Реновация городской среды: исторические precedents // Ответственный редактор-составитель И.А. Бондаренко. Монография. СПб: archi.ru/ Коло, 2021. 333 с. [Renovation of the urban environment: historical precedents // I.A. Bondarenko. Monograph. SPb: archi.ru/ Kolo, 2021. 333 p.]
5. Андрианова Е.И., Губачева Т.А., Сапроненко А.В., Халимон Е.А. Анализ опыта реализации проектов городского редевелопмента в России // E-Management. 2021. Т. 4, № 3. С. 20–33. DOI: 10.26425/2658-3445-2021-4-3-20-33 [Andrianova E.I., Gubacheva T.A., Sapronenko A.V., Khalimon E.A. (2021) Analysis of the experience of implementing urban redevelopment projects in Russia. E-Management, vol. 4, N. 3, P. 20–33.]
6. Зима А.Г. Реновация промышленных территорий. Опыт Москвы (1990-2010 годы) // Международный журнал гуманитарных и гуманитарных наук. 2021. №5-1. DOI:10.24412/2500-1000-2021-5-1-26-30. [Zima A.G. Renovation of industrial areas. Experience of Moscow (1990-2010) // International Journal of Humanities. 2021. № 5-1.]
7. Zaletova E., Ismagilova S., Arsentyeva Y. Sustainable urban regeneration of brownfield sites //E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 274. P. 01015. DOI: 10.1051/e3sconf/202127401015.
8. Закиева Л.Ф., Мишкарева Т. А. Редевелопмент промышленных территорий прибрежных зон крупных городов в устойчивые экономические районы // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика, 2023, 2 (2), с. 133-138 [Zakieva L.F., Mishkareva T. A. Redevelopment of industrial areas of coastal zones of large cities in sustainable areas// Architecture. Restoration. Design. Urban science, 2023, 2 (2), P. 133-138]
9. Nawratek, Krzysztof, editor. Urban Re-Industrialization. Punctum Books, 2017. JSTOR, DOI: 10.2307/jj.2353778
10. Гусарова Л. В. Социально-экономическое развитие Альметьевской агломерации в рамках Стратегии «Татарстан – 2030» // Трансформация национальной социально-экономической системы России: Материалы I Международной научно-практической конференции, Москва, 30 ноября 2018 года. 2019. С. 157-164. [Gusarova L. V. Socio-economic development of the Almyteevsk agglomeration within the framework of the Strategy “Tatarstan - 2030” // Transformation of the national socio-economic system of Russia: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 30, 2018. 2019. P. 157-164]
11. Минкин М. Р., Данилова И. Ю. Урбанизационные процессы в нефтяном регионе Татарстана В 1950-1960-е гг. // Общество: философия, история, культура. 2020. №9 (77). [Minkin M. R., Danilova I. YU. Urbanization processes in the oil region of Tatarstan in the 1950-1960s. // Society: philosophy, history, culture. 2020. №9 (77)]

12. Lavrinenko P. A., Romashina A. A., Mikhailova T. N, Chistyakov P. A. Agglomeration effect as a tool of regional development // Studies on Russian Economic Development, 2019. Vol. 30. № 3. P. 268-274. DOI: 10.1134/S1075700719030109.
13. Галиева Э.А., Зверко М.Т., Гилязетдинов Т.А. Постнефтяная эпоха малых городов: ревитализация промышленных территорий города Альметьевска // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика, 2023, 2 (2), с. 151-161. [Galieva E.A., Zverko M.T., Gilyazetdinov T.A. Post-oil era of small towns: revitalization of industrial territories in Almeteyevsk city // Architecture. Restoration. Design. Urban Science, 2023, 2 (2), P. 151-161.]
14. Бородина Н. А., Шефер В. В. Модернизация промзон как инструмент развития городов // Современные общественные пространства как инструмент развития городской среды: Материалы IV Межрегиональной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 04–05 апреля 2022 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 362-367. [Borodina N. A., Shefer V. V. Modernization of industrial zones as a tool for urban development // Modern public spaces as a tool for the development of the urban environment: Proceedings of IV Interregional Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 04–05, 2022. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022. P. 362-367.]
15. Файзрахманова Г. Р., Закирова Ю. А. Подходы к формированию объемно-пространственного регламента бывших промышленных территорий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2023. № 4(59). С. 22-27. DOI 10.25628/UNIIP.2023.59.4.003. [Fajzrahanova G. R., Zakirova Yu. A. Approaches to the formation of volumetric-spatial regulations of former industrial territories // Academic bulletin of UralNIIproekt RAASN. 2023. № 4(59). P. 22-27.]

### Информация об авторах

**Хафизов Павел Сергеевич**, архитектор, ООО Архитектурно-инженерная компания «Реновация», г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: pavelhafizov@yandex.ru*

**Закирова Юлия Александровна**, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

*E-mail: jzakirova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0143-2502*

### Information about the authors

**Pavel S. Khafizov**, architect, LLC Architectural and engineering company “Renovation”, Kazan, Russian Federation

*E-mail: pavelhafizov@yandex.ru*

**Yuliya A. Zakirova**, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

*E-mail: jzakirova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0143-2502*



УДК: 712

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.17

EDN: PSJIRN

## От спортивного праздника к городскому наследию: бульвар «Фестивальный» в городе Казань

Г.Р. Давлетьянова<sup>1</sup>, К.Р. Давлетьянова<sup>2</sup>, Н.Е. Троепольская<sup>3</sup>,  
А.А. Валиуллин<sup>3</sup>, Т.Р. Нураев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт Татарской энциклопедии и регионоведения имени Мансура Хасанова  
Академии наук Республики Татарстан,

<sup>2</sup>Архитектурное бюро ZARF,

<sup>3</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Статья посвящена анализу авторской концепции бульвара «Фестивальный» в городе Казани, как объекта спортивного городского наследия, созданному в рамках подготовки к Чемпионату мира по футболу 2018 года. Проект разрабатывался не только с учетом мероприятия, но и с перспективой долгосрочного его использования. Проектом успешно адаптированы навигация территории и символика праздника к изменяющимся потребностям горожан после проведения мероприятия. Также рассматриваются детали реализации концепции, включая элементы ориентирования и планирования зон отдыха, их озеленение, создание условий для безопасного использования средств индивидуальной мобильности. Целью статьи является изучение реализованного проекта бульвара «Фестивальный» в г. Казань, как обширного комплекса мероприятий по созданию комфортной среды в рамках спортивного мероприятия и перспективы его долгосрочного использования для жизнедеятельности горожан. Задачи исследования: анализ муниципальных, региональных программ и федеральных программ в области комфортной среды; формирование принципов концепции пространства; возможности использования событийного мероприятия для обновления инфраструктуры города.

**Результаты.** Авторы установили, что комплексная работа с городскими пространствами началась на территории Республики Татарстан в 2015 году в связи с принятием программы о развитии общественных пространств. Концепция развития бульвара основана на двух основных принципах: системность и динамичность. Исследование показало, что бульвар является жизнеспособным пространством и играет важную роль в имидже города, как для местных жителей, так и для туристов.

**Выводы.** Сценарный подход в развитии данного общественного пространства позволил сделать территорию памятной, востребованной и посещаемой. Реализованный проект можно считать положительным примером материального городского наследия спортивного мега-события. Деятельность этого объекта устойчива в экономическом, экологическом и социальном аспектах.

**Ключевые слова:** инфраструктура, туризм, градостроительство, общественные пространства, спортивное событие, Чемпионат мира по футболу 2018, современное наследие

**Для цитирования:** Давлетьянова Г.Р., Давлетьянова К.Р., Троепольская Н.Е., Валиуллин А.А., Нураев Т.Р. От спортивного праздника к городскому наследию: бульвар «Фестивальный» в городе Казань // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 193-204, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.17, EDN: PSJIRN

## From sports festival to urban heritage: “Festivalny” Boulevard in Kazan

G.R. Davletyanova<sup>1</sup>, K.R. Davletyanova<sup>2</sup>, N.E. Troepol'skay<sup>3</sup>,  
A.A. Valiullin<sup>3</sup>, T.R. Nugaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Tatar Encyclopedia and Regional Studies named after Mansur Hasanov of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan,

<sup>2</sup>architectural bureau ZARF,

<sup>3</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The article is devoted to the analysis of the author's concept of Festivalny Boulevard in the city of Kazan as a site of urban sports heritage, created in preparation for the 2018 FIFA World Cup. The project was developed not only with the event in mind, but also with the prospect of its long-term use. The project successfully adapted the navigation of the territory and the symbolism of the holiday to the changing needs of citizens after the event. The article also discusses the details of the implementation of the concept, including elements of orientation and planning of recreation areas, their landscaping, and the creation of conditions for the safe use of personal mobility equipment. *The purpose of the article* is to study the implemented project of the Festivalny Boulevard in Kazan, as an extensive set of measures to create comfortable environment within the framework of the sporting event and the prospects for its long-term use for the life of citizens. *Research objectives:* analysis of municipal, regional and federal programs in the field of comfortable environment; formation of principles of the concept of space; the possibility of using the event to update the city's infrastructure.

*Results.* The authors found that comprehensive work with urban spaces began in the Republic of Tatarstan in 2015 in connection with the adoption of a program for the development of public spaces. The development concept of the boulevard is based on two main principles: consistency and dynamism. The study found that the boulevard is a viable space and plays an important role in the city's image for both locals and tourists.

*Conclusions.* The scenario approach to the development of this public space made it possible to make the territory memorable, demanded and visited. The implemented project can be considered a positive example of the tangible urban heritage of a sports mega-event. The operation of this facility is sustainable in economic, environmental and social aspects.

**Keywords:** infrastructure, tourism, urban planning, public spaces, sports event, 2018 FIFA World Cup, modern heritage

**For citation:** Davletyanova G.R., Davletyanova K.R., Troepol'skay N.E., Valiullin A.A., Nugaev T.R. From sports festival to urban heritage: “Festivalny” Boulevard in Kazan // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 193-204, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.17, EDN: PSJIRN

### 1. Введение

В мае 2018 года в Казани состоялось спортивное мега-событие – «Мундиаль – 2018». Это событие качественно повлияло на изменения материальной и нематериальной среды города. Совершенствование городской инфраструктуры в процессе проведения подобного мероприятия - это неотъемлемая материальная составляющая спортивного городского наследия. Его интеграция, планирование развития и эффективное использование после окончания мероприятий остаются важными задачами проектирования, устойчивого в экономическом, экологическом и социальном аспектах. Обзор мирового опыта реализации мега-событий и анализ краткосрочных и долгосрочных последствий их реализации свидетельствуют об исключительном значении дальнейшего использования материальных объектов спортивного наследия [1-3].

В настоящее время вопросы развития и организации городской инфраструктуры приобретают все большее значение в контексте устойчивого развития городов [4-6]. Зарубежные авторы акцентируют внимание на модернизации разрастающихся территорий городов, перераспределении уличного пространства, создании значимых для города локаций [7-9]. Исследователи обращают внимание на то, что необходимо разрабатывать стратегии развития с участием населения, на базе предпочтений фокус-групп [10,11]. Нужны пешеходные улицы, но также необходима трансформация городских пространств для развития велосипедного движения [12,13]. Многие исследователи изучают зеленую среду городов, чувствительность зеленых насаждений к разрастанию городов [14,15].

Малые архитектурные формы, а также материальные и нематериальные аспекты городской среды также в фокусе внимания российских авторов [16,17]. Многие из них рассматривают в своих работах архитектурно-планировочные решения общественных пространств [18]. Большое внимание уделяется вопросам трансформации городской среды и формирования новых улиц на базе кластерного подхода [19,20]. Представляет интерес статья о создании публичных и общественных парков в прибрежных зонах, что наряду с оформлением береговой линии привело к формированию городских набережных [21].

Городские сады и бульвары рассматриваются авторами на примере различных городов в Российской Федерации [22,23]. Опыт Республики Татарстан в развитии общественных пространств изучается на примере бульвара «Белые цветы» [24-26]. Кроме того, большое внимание уделяется направлениям развития городской инфраструктуры города Чистополь [27].

Целью статьи является изучение реализованного проекта бульвара «Фестивальный» в г. Казань, как обширного комплекса мероприятий по созданию комфортной материальной городской среды в рамках спортивного мероприятия и перспективы его долгосрочного использования для благоприятной жизнедеятельности горожан. Приоритетными задачами являются анализ муниципальных, региональных программ и федеральных программ в области комфортной среды; формирование принципов концепции пространства; возможности использования событийного мероприятия для обновления инфраструктуры города.

## 2. Материалы и методы

В работе проведен анализ авторской концепции, технологий и материальных возможностей современного архитектурного проектирования в области благоустройства городских пространств. Определены долгосрочные перспективы использования этого обновленного городского пространства, в качестве спортивного наследия, переданного городу в результате проведения всемирного события. Проектное решение принято на основе данных, полученных с помощью кросс-культурного анализа жизненных стратегий города, архитектурно-градостроительного предпроектного обследования городской среды, анализе ресурсного потенциала места.

Проведенный кросс-культурный опрос позволил учесть запрос горожан различной культурной идентификации и определить, как универсальные, так и специфические приемы проектного арсенала при создании коммуникативно-интегрированной городской среды. Проведенное исследование показало определенную универсализацию подходов и методов функционально-пространственной организации территории в условиях пролонгированного использования благоустроенной территории после проведения спортивного мега-события в Казани.

Архитектурно-градостроительное предпроектное обследования включало в себя:

- фиксацию и анализ сложившейся ситуации, определение принципов и закономерностей функционирования территории, выявление градостроительных и социокультурных проблем, определение композиционного каркаса с ритмометрическими закономерностями застройки и характеристикой фронта уличной застройки, векторность композиционных осей, открытости и замкнутости планировочных образований этой локальной территории. Результаты представлены на графо-аналитических схемах. На его

основе было выполнено проектное предложение, которое позволило создать выразительную сетку композиционных осей, лояльную по отношению к устойчивым элементам городской среды, сохранить и упорядочить ландшафт, интегрировать сложившуюся схему пешеходных связей, функционально, символически и образно наполнить пространство за счет размещения малых архитектурных форм, элементов благоустройства, определить типы мощения для разных функциональных зон, высотность посадочного материала, создать безбарьерную безопасную среду.

### 3. Результаты и обсуждение

Проектируемый бульвар расположен вдоль ул. Декабристов, в г. Казань. С градостроительной точки зрения, выбранный отрезок улицы Декабристов представляет собой любопытный феномен. После активизации строительной деятельности в XX веке на ней преобладали общественные здания и минимальное количество жилья. Визуальные разрывы между зданиями, которые мешали воспринимать улицу как целостную структуру, в данной ситуации способствовали созданию бульвара — не просто улицы, но улицы с зонами отдыха.

Успешная реализация проекта общественного пространства чаще всего объединяет несколько муниципальных и региональных программ. Бульвар «Фестивальный» был устроен в результате взаимодействия нескольких стратегических инициатив: плана подготовки к Чемпионату мира по футболу-2018<sup>1</sup>, федеральной программы «Формирование комфортной городской среды»<sup>2</sup> и республиканской «Программы развития общественных пространств»<sup>3</sup>. Бульвар объединил исторически сложившиеся пространства, и согласовал между собой различные городские и региональные проекты, относящиеся к данной территории. Так, он продолжил вектор развития правого берега реки Казанка, начатый в период подготовки к Всемирной летней Универсиаде 2013 года, в рамках которого была реконструирована Ленинская дамба. Через пять лет естественным продолжением реконструкции стала пешеходная зона бульвара «Фестивальный». Бульвар и создал связь с новой дорогой по улице Бондаренко<sup>4</sup>. Этот момент, вероятно, малозаметен в контексте внешнего успеха проекта. Не следует забывать также, что он в перспективе может представлять собой часть долгосрочной памяти и наследия, переданного городу в результате этого всемирного события.

Возможность комплексной работы с городскими пространствами появилась благодаря «Программе развития общественных пространств», которая начала реализовываться на территории Татарстана еще в 2015 году. С момента ее запуска Президентом Республики Татарстан Р.Н. Миннихановым в 2015–2018 гг. было преобразовано 328 пространств во всех 45 муниципальных образованиях Республики<sup>5</sup>.

В свою очередь, любая программа Республики Татарстан отталкивается от ее стратегии социально-экономического развития, которая рассматривает Человека как главную ценность. Создание благоприятных условий для его развития и совершенствования — высшая цель Стратегии. Мерой успешности развития региона является качество жизни населения, и принимаемые в рамках проекта программы способствуют созданию благоприятного имиджа республики<sup>6</sup>. Одним из успешно

<sup>1</sup> Постановление КМ РТ от 25 декабря 2013 года № 1056 «Об утверждении Программы подготовки к проведению в 2018 году чемпионата мира по футболу (с изменениями на 28 декабря 2019 года)», <https://docs.cntd.ru/document/463307283>

<sup>2</sup> Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды», <https://gorodsreda.ru>

<sup>3</sup> Программа развития общественных пространств РТ, <http://park.tatar>

<sup>4</sup> Постановление Исполнительного комитета г. Казани от 28.12.2018 №6574 Об утверждении проекта межевания территории линейного объекта «Строительство ул. Бондаренко от ул. Солдатская до ул. Сибгата Хакима г. Казани». Официальный сайт Мэрии Казани, [https://www.kzn.ru/upload/iblock/44c/6574\\_28.12.2018.pdf](https://www.kzn.ru/upload/iblock/44c/6574_28.12.2018.pdf)

<sup>5</sup> [https://totalarch.com/aga\\_khan\\_award\\_for\\_architecture\\_2019/tatarstan\\_public\\_spaces\\_development\\_program](https://totalarch.com/aga_khan_award_for_architecture_2019/tatarstan_public_spaces_development_program)

<sup>6</sup> Закон Республики Татарстан от 17 июня 2015 года № 40-ЗРТ «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года».

реализованных проектов Программы стал бульвар «Фестивальный», открытие которого состоялось 12 июня, накануне Чемпионата мира по футболу 2018.

Учитывая результаты предпроектного анализа для создания кросс-культурного ощущения города, авторский коллектив архитекторов решил строить концепцию на двух основополагающих принципах организации пространства: пространство как «система навигации» и пространство как «символ». Авторами проекта выступили К. Давлетьянова, Г. Давлетшин, А. Сафина, А. Хазиахметов, В. Салыхова, А. Фан-Юнг, Г. Никифоров, Д. Митряева, с экспертной поддержкой Л. Гиззятовой и Д. Толовенковой. Первая часть концепции была ориентирована на функциональные аспекты, такие как: обеспечение удобства, понятности и логичности в передвижении, комфорта для пешеходов, особенно в их стремлении добраться до целевой точки маршрута — Фестиваля болельщиков, который проходил у Центра семьи «Казань». Вторая часть концепции фокусировалась на аспектах, связанных с ментальным восприятием и долгосрочными эффектами. Авторы в процессе создания концепции задавались вопросами о том, какие декоративные элементы и символика останутся в городе после завершения события, каким образом можно сохранить память о Чемпионате мира по футболу и как интегрировать праздничные символы в повседневную городскую среду без утраты своей уникальности и значимости.

Первый принцип, на котором строилась концепция — это принцип системности при создании вариантов ориентирования. Бульвар должен был стать яркой динамичной средой, в которой не потерянется ни один турист нашего города, а жители быстро сориентируются благодаря современным указателям — арт-объектам, которые покажут им нужное направление. Уникальная навигация разработана впервые для улицы г. Казани на трех языках: татарском, русском и английском. Она сочетает в себе элементы ориентирования в пространстве (карта, значки-указатели), а также функцию арт-объекта (форма «стрелки» является универсальным символом движения вперед). Элементы навигации представлены в виде инфостендов, стел, а также объемных стрелок. Каждый указатель имеет сменяемую цветную подсветку. Дизайн указателей поддерживает стилистику улицы — для этого применены деревянные рейки и зеркальная нержавеющая сталь. Не дадут потеряться пешеходам «иконки» известных мест в городе, например, Центра семьи «Казань» и т.д. Немаловажно то, что навигация была разработана с учетом потребностей слабовидящих людей: специально для них применен шрифт Брайля, а все значки осозаемы. Но ориентирование не ограничилось только указателями. В систему включался также рисунок покрытия бульвара — черно-белые динамичные полосы из брускатки, указывающие направление пути. В комплексе они работают как интуитивные подсказки к движению в нужном направлении (рис. 1).



Рис. 1. Инфостенды, объемные стрелки указателей (Источник: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))  
Fig. 1. Information stands, three-dimensional pointer arrows (Source: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))

Второй принцип – создание пространства, как «символа». Символизм метафор при создании общественного городского пространства создал универсальный, кросскультурный язык, способствующий развитию воображения и усилению впечатления. Так, ощущение динамичности нашло отражение в рисунке плана нового бульвара: дорожки направлены таким образом, что, не повреждая деревья, они описывают параболу вдоль улицы Декабристов, дублируя основной прямой маршрут (рис. 2).



Рис. 2. Схема бульвара (иллюстрация авторов)  
Fig. 2. Boulevard layout ( illustration by the authors)

Маршрут отсылает нас к траектории полета мяча — стремительному движению. «Движение получает логическое завершение на площади перед зданием АО «Татмедиа», где вся энергия броска концентрируется на пересечении основных потоков пешеходов и образует новую памятную площадь.

Центром ее становится композиция из 32 шаров с названиями стран-участниц FIFA 2018 и одного центрального шара, символизирующего содружество стран этого кубка». Композиция составлена таким образом, что создается ощущение случайно рассыпанных шариков, которые попали в «сетку» плавных линий площади, выложенных брусчаткой разных цветов (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент генплана бульвара, где: 2-рекреационная зона, 3-зона отдыха, 4- пергола, 9-остановочные павильоны, 10- двусторонний веломаршрут, 11-пергола с сидениями и качелями, 12-арт-объект, 14-островки отдыха, 16-пешеходный мост. (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Fragment of the general plan of the boulevard, where: 2-recreational area, 3- leisure area, 4- pergola, 9- bus stop pavilions, 10-two-way bicycle route, 11-pergola with seats and swings, 12-art object, 14-recreation islands, 16 - pedestrian bridge. (illustration by the authors)

Центральный металлический шар с аббревиатурами стран, утопленный в брускатку, олицетворяет спортивную синергию участников и одновременно футбольный мяч. По задумке архитекторов, он завершил полет «в воротах» — рисунке площади — и распался на маленькие шары (команды стран). Центральный шар подсвечивается ночью мягким светом (рис. 4).

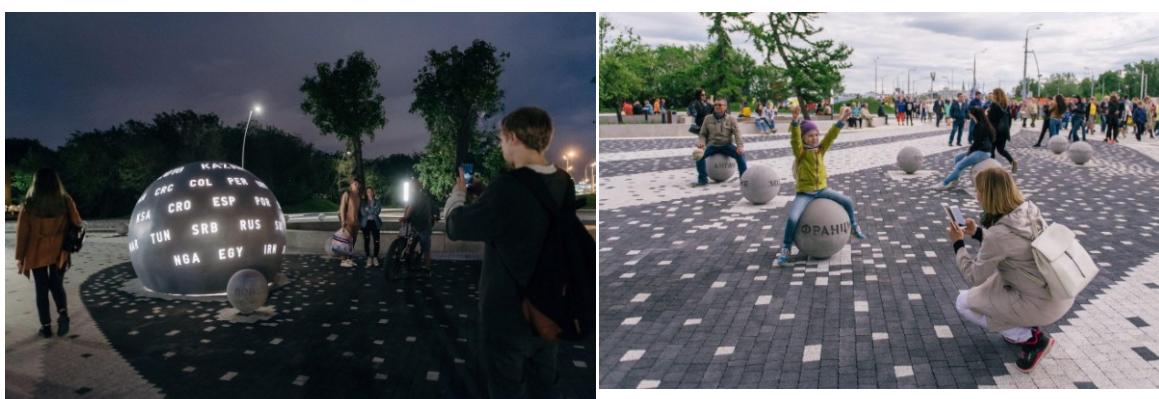


Рис. 4. Композиция из 32 шаров с названиями стран-участниц FIFA 2018 и одного центрального шара (Источник: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))

Fig. 4. A composition of 32 balls with the names of the participating countries of FIFA 2018 and one central ball (Source: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))

Тонкий подход к деталям и выверенный минимализм позволил встроить новое пространство в окружающую его среду. Так, например, ширина бульвара была рассчитана исходя из предполагаемых потоков горожан в День города и в День Победы. Акцент на этом был сделан не случайно: улица Декабристов именно в эти праздники принимает основную нагрузку в виде посетителей, идущих смотреть салют на берег реки Казанки. Это уже стало устойчивой городской традицией.

Проектом учтена перспектива роста крупномерных растений. В основное покрытие променада внедрены « капли » из деревянного настила, которые аккуратно обходят стволы взрослых деревьев, давая им возможность дышать, и одновременно обеспечивают доступность среды. Лиственницы и ели на площади образовали « острова » зелени с окружающими их плавными скамьями из антивандального материала- стекло-фибробетона и деревянных реек (рис. 5).



Рис. 5. Озеленение (Источник: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))

Fig. 5. Landscaping (Source: [https://park.tatar/fest\\_bldv](https://park.tatar/fest_bldv))

Несколько слов стоит сказать и об общественных взаимоотношениях на бульваре. После проведенного анализа архитекторами был предложен принцип модульности предметного наполнения бульвара, который мог бы обратимо трансформироваться. Были специально разработаны скамейки для бульвара, модули которых, сложенные друг с другом в разных комбинациях образуют «соту» - самоподобную ячейку футбольного мяча – символа памятного мероприятия. Эти яркие запоминающиеся модульные скамейки сконцентрированы у входной зоны станции метро. Автобусная остановка с перголой и качелями стали популярными и часто фотографируемыми арт-объектами в городе. Так бульвар сделал зоны ожидания у остановок общественного транспорта комфортными с точки зрения дизайна и благоустройства.

Был спроектирован и отделен от пешеходной дорожки маршрут для велосипедистов, который обеспечил комфортное пространство и тем, и другим пользователям.

Авторы проекта предугадали популярность передвижения на самокатах: широкая пешеходная зона из брускатки без фаски, а также велодорожка востребованы у жителей и туристов. Пандемия COVID-19 повысила спрос на мобильность, и индивидуальный транспорт стал спасением в этой ситуации, а бульвар «Фестивальный» — идеальным маршрутом, соединяющим жилые районы и центр. Постпандемийное время на территории было отмечено национальными праздниками. Например, в 2022 году на бульваре проходил мастер-класс на татарском языке по кряшенскому танцу<sup>1</sup>, а в 2023-м — чувашский праздник «Медиа-Уяв» от республиканской газеты «Сувар»<sup>2</sup> в честь своего

<sup>1</sup> <https://kzn.ru/meriya/administratsii-rayonov/aviastroitelnyy-i-novo-savinovskiy/novosti/na-master-klassie-na-bulvare-festivalnyy-kazantsy-izuchili-dvizheniya-kryashenskogo-tantsa/>

<sup>2</sup> <https://www.tatar-inform.ru/news/vystavka-koncert-i-pokaz-cuvasskogo-kostyuma-v-kazani-vpervye-otmetili-media-uyav-5911606>

30-летия. Посещение бульвара входит в маршрут различных экскурсий, например, таких как «Новая Казань», а также является частью уникального турпродукта «Эхо мундиля» — особой прогулки по местам, которые посещали фанаты и известные игроки футбольных сборных мира.

В настоящий момент бульвар является жизнеспособным пространством и играет важную роль в имидже города, как для местных жителей, так и для туристов. Кроме того, бульвар символизирует стремление к мечте, являясь пространством разнообразных смыслов. В профессиональном спорте мечта становится сильной мотивацией и помогает спортсменам быть лучше, выигрывать чемпионаты страны и мира. Бульвар «Фестивальный» стал успешным примером использования событийного мероприятия для обновления инфраструктуры города. Сценарные подходы в развитии данного общественного пространства позволили сделать территорию памятной, востребованной и посещаемой. Данный бульвар продолжил вектор развития общественных пространств города Казань, соединил набережную реки Казанки с территорией торгово-развлекательного центра «Тандем».

#### 4. Заключение

1. Авторы установили, что комплексная работа с городскими пространствами началась на территории Республики Татарстан в 2015 году в связи с принятием программы о развитии общественных пространств. Бульвар выступил связующим элементом, он объединил разрозненные исторически сложившиеся пространства, продолжил вектор развития правого берега реки Казанка.

2. Концепция развития бульвара основана на двух основных принципах: системность и динамичность. Элементы навигации представлены в виде инфостендов, стел, а также объемных стрелок. Образ указателей поддерживает общую стилистику улицы. Динамичность отражается в рисунке плана нового бульвара: дорожки описывают параболу вдоль улицы Декабристов, дублируя основной прямой маршрут, повторяя траекторию полета мяча.

3. Бульвар «Фестивальный» стал для велосипедистов и любителей самокатов идеальным маршрутом, соединяющим жилые районы и центр города. Сейчас бульвар играет важную роль пространства для встреч, как для местных жителей, так и для туристов.

#### Список литературы / References

1. Казакова М.В., Андронова О.А. Идеи мега-событий и их влияние на социально-экономический положение в стране // Экономические отношения. – 2019. – Том 9. – № 2. – С. 911-932 [Kazakova M.V., Andronova O.A. The ideas of mega-events and their impact on the socio-economic situation in the country // Economic relations. – 2019. – Volume 9. – No. 2. – P. 911-932]
2. Павлова О.И., Голубева Г.Н., Кириллова Т.Г. Социальное и материальное наследие как итог проведения крупных международных спортивных игр в Российской Федерации // Теория и практика физической культуры. - 2014. - № 4. - С. 8-14 [Pavlova O.I., Golubeva G.N., Kirillova T.G. Social and tangible heritage as a result of holding major international sports games in the Russian Federation // Theory and practice of physical culture. - 2014. - No. 4. - P. 8-14].
3. Гуреева Е.А. Анализ сущности и содержания понятия «наследие крупномасштабных спортивных событий» // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 1 [Gureeva E.A. Analysis of the essence and content of the concept of "heritage of large-scale sporting events" // Modern problems of science and education. – 2019. – № 1]
4. Закирова Т.Р. Возникновение типов общественных зданий Казани и эволюция принципов их размещения в структуре города в XV-XVIII вв. // Научное обозрение. – 2017. – № 3. – С. 23-26. [Zakirova T.R. The emergence of types of public buildings in Kazan and the evolution of the principles of their placement in the

- structure of the city in XV-XVIII centuries // Scientific review. – 2017. – No. 3. – P. 23-26.] – EDN YHFBBV.
5. Покка Е.В., Пономарев Е.С., Тимакова В.А. Формирование архитектуры многоуровневых общественных пространств: из опыта зарубежных стран Гуманитарные науки в XXI веке: научный Интернет-журнал. – 2022. – № 19. – С. 99-109. [Pokka E. V., Ponomarev E.S., Timakova V.A. Formation of the architecture of multi-level public spaces: from the experience of foreign countries Humanities in XX century: scientific Online journal. – 2022. – No. 19. – P. 99-109.] – EDN GGRVXN.
  6. Сабитова А.И. К понятию «общественные пространства города» // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. – 2023. – № 2(2). – С. 108-116. [Sabitova A. I. To the concept of “public spaces of the city” // A. R. D. U. – 2023. – No. 2(2). – P. 108-116.] – EDN FUOBFI.
  7. Keunhyun Park. Regreening suburbia: An analysis of urban greening approaches in U.S. sprawl retrofitting projects// Urban Forestry & Urban Greening 88 (2023) 128092. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128092>
  8. Oddrun Helen Hagen, Aud Tennøy. Street-space reallocation in the Oslo city center: Adaptations, effects, and consequences// Transportation Research Part D 97 (2021) 102944. –<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102944>
  9. Pablo Martí, Clara García-Mayor, Almudena Nolasco-Cirugeda, Leticia Serrano-Estrada. Green infrastructure planning: Unveiling meaningful spaces through Foursquare users’ preferences//Land Use Policy 97 (2020) 104641. – <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104641>
  10. Robert Newell, Ian Picketts. Spaces, places and possibilities: A participatory approach for developing and using integrated models for community planning// City and Environment Interactions 6 (2020) 100040. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100040>
  11. Стародубец А.А. Анализ российских и зарубежных практик соучаствующего проектирования общественных пространств // Академический вестник УралНИИпроект РААЧ. – 2020. – № 3(46). – С. 70-74. [Starodubets A.A. Analysis of Russian and foreign practices of participatory design of public spaces // Academic bulletin UralNIIproekt RAASN. – 2020. – No. 3(46). – P. 70-74.] – DOI 10.25628/UNIIP.2020.46.3.012. – EDN OJVXDK.
  12. Soudabeh Shahmoradi, Sayyed Mahdi Abtahi, Pedro Guimarães. edestrian street and its effect on economic sustainability of a historical Middle Eastern city: The case of Chaharbagh Abbasi in Isfahan, Iran// Geography and Sustainability 4 (2023) 188–199. – <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.03.006>
  13. Francesco Pirasa, Beatrice Scappini, Italo Meloni. The transformation of urban spaces as a cycling motivator: the case of Cagliari, Italy// Transportation Research Procedia 60 (2022) 60–67. – <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
  14. Maria Jesus Garcia-Garcia, Lucille Christien, Enrique García-Escalona, Concepción González-García. Sensitivity of green spaces to the process of urban planning. Three case studies of Madrid (Spain)// Cities 100 (2020) 102655. – <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102655>
  15. Maya Elnesr, Noha Gamal Said. Sketch, Photo, Sound: Lived and Represented Space of the Child Experience in the Green Built Environments. Studying the Eco-districts in France// Ain Shams Engineering Journal 14 (2023) 102113. – <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102113>
  16. Khusnutdinova S., Faizrakhmanova G., Khusnutdinov R. Tangible and intangible assets of city environment: architecture, city lighting and art aspects // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, April, 29 – May, 15, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012020. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012020. – EDN KMZZAK.
  17. Курочкина В.А., Калиниченко Е.К., Белова М.О. Малые архитектурные формы в структуре открытых общественных пространств города// Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 5. [Kurochkina V.A., Kalinichenko E.K., Belova M.O. Small

- architectural forms in the structure of open public spaces of the city // Bulletin of Eurasian Science. – 2021. – T. 13, No. 5.] – DOI 10.15862/28NZVN521. – EDN CZVMUM.
18. Pokka E., Ponomarev E., Timakova V. Formation factors of the architecture of multilevel public spaces on the example of the countries of North America and Asia // 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. 1012. – DOI 10.1051/e3sconf/202127401012. – EDN KVIYFV.
19. Zakirova, Y.A. Transformation of the City Environment: Functional-Planning and Territorial Aspects / Y.A. Zakirova, G.R. Faizrakhmanova, S.R. Khusnudinova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019", Vladivostok, October, 01–04, 2019. Vol. 753, 4, Chapter 3. – Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 042069. – DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042069. – EDN QDLHJA.
20. Преловская Е.С. Мультифункциональное уличное пространство: формирование новых классов улиц на основе кластерного анализа // Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 3(24). – С. 129-134. [Prelovskaya E.S. Multifunctional street space: formation of new classes of streets based on cluster analysis // Urban planning and architecture. – 2016. – No. 3(24). – P. 129-134.] – DOI 10.17673/Vestnik.2016.03.21. – EDN WWOJCP.
21. Полещук М.Н., Клименко И.В. Развитие общественных пространств в прибрежных зонах крупнейших городов Поволжья / М.Н. Полещук, // Архитектура и современные информационные технологии. – 2022. – № 2(59). – С. 225-244. [Polleshchuk M.N., Klimenko I.V. Development of public spaces in the coastal zones of the largest cities of the Volga region / M.N. Polleshchuk, // Architecture and modern information technologies. – 2022. – No. 2(59). – P. 225-244.] – DOI 10.24412/1998-4839-2022-2-225-244. – EDN RWTLA.
22. Агафонова А.Б. Городские сады и бульвары в пространстве Череповца и в повседневных практиках горожан в 1870-1930-х гг // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. – 2019. – № 6(63). – С. 73-82. [Agafonova A.B. City gardens and boulevards in the space of Cherepovets and in the everyday practices of citizens in the 1870-1930s // Bulletin of the Surgut State Pedagogical University. – 2019. – No. 6(63). – P. 73-82.] – DOI 10.26105/SSPU.2019.63.5.001. – EDN BQFPPU.
23. Нямдорж Н., Смолин Е.Е., Большаков А.Г. Пространственное поведение как основа организации благоустройства территории бульваров на примере Г. Иркутска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 1(24). – С. 208-221. [Nyamdzorzh N., Smolin E.E., Bolshakov A.G. Spatial behavior as the basis for organizing the improvement of the territory of boulevards using the example of Irkutsk // News of universities. Investments. Construction. Real estate. – 2018. – Vol. 8, No. 1(24). – P. 208-221] – EDN WBEYYP.
24. Яо Л.М., Яо М.К., Еманова Ю.Г., Карамова К.Х. Реновация общественных пространств: опыт Республики Татарстан // Архитектура и строительство России. – 2022. – № 3(243). – С. 106-107. [Yao L.M., Yao M.K., Emanova Yu.G., Karamova K.H. Renovation of public spaces: experience of the Republic of Tatarstan // Architecture and construction of Russia. – 2022. – No. 3(243). – P. 106-107.] – EDN DHRJBK.
25. Ильина Е.В. Проектные мероприятия по благоустройству и озеленению сквера в Авиастроителе районе города Казани // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 1(150). – С. 451-458. [Ilyina E.V. Project activities for the improvement and landscaping of a public garden in the Aviastroitelny District of Kazan // Economics and Entrepreneurship. – 2023. – No. 1(150). – P. 451-458] – DOI 10.34925/EIP.2023.150.1.090. – EDN BOUZGR.

26. Снигирева Н., Смирнов Д.Е. "Белые цветы": социально-средовое проектирование как инструмент развития территорий // Архитектура и строительство России. – 2021. – № 2(238). – С. 63-72. [Snigireva N.V., Smirnov D.E. "White flowers": social and environmental design as a tool for the development of territories // Architecture and construction of Russia. – 2021. – No. 2(238). – P. 63-72.] – EDN ZGXDXH.
27. Романова А.И., Шагиахметова Э.И., Рахматуллин А.И., Карпова И.В., Мардамшина Э.Ф. Основные направления совершенствования городской инфраструктуры г. Чистополь // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 2(151). – С. 466-472. [Romanova A.I., Shagiakhmetova E.I., Rakhmatullin A.I., Karpova I.V., Mardamshina E.F. Main directions for improving the urban infrastructure of Chistopol // Economics and Entrepreneurship. – 2023. – No. 2(151). – P. 466-472.] – DOI 10.34925/EIP.2023.151.2.091. – EDN SHWBXZ.

### Информация об авторах

**Давлетьянова Гульнара Рузалитовна**, научный сотрудник Центра энциклопедистики, Институт Татарской энциклопедии и регионаоведения имени Мансура Хасанова Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российской Федерации  
*Email: guli66@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7011-6611*

**Давлетьянова Карина Радиковна**, архитектор, архитектурное бюро ZARF, г. Казань, Российской Федерации, автор проекта бульвара «Фестивальный».  
*Email: karina.davletyanova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1444-4426*

**Троепольская Наталья Евгеньевна**, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российской Федерации  
*Email: tronata76@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4686-8409*

**Валиуллин Алмаз Анасович**, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российской Федерации  
*Email: Valiullin.almaz87@yandex.ru*

**Нугаев Тимур Рашидович**, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российской Федерации  
*Email: skrech.adc@gmail.com*

### Information about the authors

**Gulnara R. Davletyanova**, Researcher at the Center for Encyclopedic Studies, Institute of Tatar Encyclopedia and Regional Studies named after Mansur Hasanov of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation  
*Email: guli66@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7011-6611*

**Karina R. Davletyanova**, architect, the author of the 'Festivalny' boulevard project, architectural bureau ZARF, Kazan, Russian Federation  
*Email: karina.davletyanova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1444-4426*

**Natalya E. Troepol'skay**, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
*Email: tronata76@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4686-8409*

**Almaz A. Valiullin**, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
*Email: Valiullin.almaz87@yandex.ru*

**Timur R. Nugaev**, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
*Email: skrech.adc@gmail.com*

УДК: 72.01

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.18

EDN: RIRXHF



## Тенденции развития бионического подхода в архитектуре

**Д.В. Серегин<sup>1</sup>, Е.И. Прокофьев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> арх. Компания CROX, г. Шанхай, Китайская Народная Республика;

<sup>2</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Природа исторически являлась источником знания и вдохновения для архитекторов, позволяя создавать новые формы, подходы, конструктивные и инженерные решения. С развитием науки в теоретическом знании архитектуры появляется направление - Бионика. Тенденции развития данного направления расширяют и изменяют понимание архитектуры, что, в конечном итоге, преображает создаваемую человеком среду. Анализируя актуальные вопросы данного подхода возможно сформировать и систематизировать архитектурный аппарат для решения многообразия вопросов архитектуры. Основной канвой и общей идеей бионики является гармонизация природы с архитектурой, позволяя природе и архитектуре быть взаимодополняющими элементами. Так же, важной частью бионического подхода является инновационность утилитарных решений архитектуры (конструктивных, функциональных эксплуатационных и др.), что позволяет находить более эффективные решения. Целью исследования является анализ исторического развития бионического подхода в архитектуре, понимание следственно-причинных связей бионических принципов и форм современных зданий и других архитектурных объектов. Задачи исследования: выделение в работах архитекторов ключевых моментов, повлиявших на формирование бионического подхода; определение основных бионических принципов; разработка графической схемы развития бионической концепции в архитектуре. Основные результаты исследования состоят в выявленной взаимосвязи этапов развития концепции бионики, пониманию логики современных вопросов и вызовов данного направления.

**Выводы.** Полученные результаты предлагают структурированную модель развития подхода с исторических предпосылок образования проблематики до настоящего времени.

**Ключевые слова:** бионика, биомиметика, биоморфизм, органика, рационализм, тектонизм, эмергентность

**Для цитирования:** Серегин Д.В., Прокофьев Е.И. Тенденции развития бионического подхода в архитектуре // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 205-220, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.18, EDN: RIRXHF

## Trends in development of the bionic approach in architecture

**D. V. Seregin<sup>1</sup>, E.I. Prokofiev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Architectural company “CROX”, Shanghai, China

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

**Abstract:** Problem statement. Nature has historically been a source of knowledge and inspiration for architects, allowing them to create new forms, approaches, constructive and engineering solutions. With the development of science, a direction called Bionics appears in the theoretical knowledge of architecture. Trends in the development of this area expand and

change the understanding of architecture, which ultimately transforms the environment created by man. Analyzing the current issues of this approach, it is possible to form and systematize an architectural apparatus for solving a variety of architectural issues. The main outline and general idea of bionics is the harmonization of nature with architecture, allowing nature and architecture to be complementary elements. Also, an important part of the bionic approach is the innovation of utilitarian architecture solutions (constructive, functional, operational, etc.), which allows us to find more effective solutions. *The purpose* of the study is to analyze the historical development of the bionic approach in architecture, to understand the causal relationships of bionic principles and forms of modern buildings and other architectural structures. *The objectives of the research* are to highlight the key points in the works of architects that influenced the formation of the bionic approach; to highlight the main bionic principles; to develop a graphical scheme for the development of the bionic concept in architecture. *The main results of the study* consist in the revealed interrelation of the stages of development of the concept of bionics, understanding the logic of modern issues and challenges in this area. *Conclusions.* The results obtained suggest a structured model for the development of the approach from the historical background of the formation of the problem to the present.

**Keywords:** bionics, biomimetics, biomorphism, organics, rationalism, tectonism, emergence

**For citation:** Seregin D. V., Prokofiev E.I. Trends in development of the bionic approach in architecture // News KSUAE, 2024, № 2(68), с. 205-220, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.18, EDN: RIRXHF

## 1. Введение

Взаимоотношения между природой и архитектурой сформированы очень давно [1, 2]. С древних времен и до настоящего времени академическая теория и практика пытаются проанализировать эквилибриум между этими двумя мирами.

Природа с ее сложностью, естественностью и эстетикой всегда была источником вдохновения для архитекторов. Начиная с древнейших цивилизаций природа из презентативно-монументального искусства стремилась интегрироваться в архитектурный код, быть неотъемлемой частью архитектурного замысла [3]. Образцом и «Венцом» такой интеграции стал Коринфский ордер - предмет долгой стилистической эволюции античного мира, привнеся в сам “код” классической архитектуры органику (Акант Коринфского ордера). Этот вектор вовлечения органики в архитектурный код, чем является ордер, можно назвать биоморфным принципом в классическом архитектурном замысле: (*βίος /bίos/* - Жить и *μορφή /morphé/* - Форма). Как природа проникала в архитектуру, так и архитектура проникала в природу - естественные элементы, природный ландшафт становившийся внутренней частью архитектурных объектов что стало другим аспектом бионики - биофилией в архитектуре: (*βίος /bίos/* - Жить и *φιλία /philía/* - Любить) [4]. Позднее, в средневековые Готика продолжает вовлечение в свой стиль органических элементов, и имея принципы выраженного структурно-эстетического артикулирования появляется конструктивная орнаментация иproto- биомиметика: (*βίος /bίos/* - Жить и *μίμησις /mimesis/* – подражание).

Рационализм 20 века был обусловлен сменой парадигм, сформированной в начале столетия с фундаментальным развитием естественных и точных наук, смешением дисциплин, что привело к распространению междисциплинарного подхода. Появилась математическая биология, которая в свою очередь стала интегрироваться как междисциплинарное знание в архитектуру 20 века [5,6]. Научный подход к архитектурно-строительным исследованиям природы в начале 1960-х годов привел к созданию нового научного и практического направления в архитектуре и строительстве – к «Архитектурной бионике» [7-9]. Слияние промышленного производства с бионическими принципами, привело к появлению новой концепции в архитектуре – Биотек [10,11]. С развитием стандартов архитектурной индустрии, что во многом связано с развитием применения компьютера, систем САПР (системы автоматизированного проектирования) и BIM (building information modeling), появлением новых методов расчета, создания и

анализа кривых в виртуальном пространстве, началось развитие комплексного эко подхода, содержащего комплексные стратегии бионики [12-14]. В архитектуре зданий и сооружений начинается имитация природных экосистем [15,16]. Таким образом, бионика направлена на создание устойчивой среды, находящейся в гармонии с экологией планеты, а также переходит в формат общественно-культурного явления [17,18].

Современный статус идей бионического подхода во многом связан с открытиями в сфере биологии, физики, математики, с развитием профессионального инструментария в архитектуре [19-21].

Целью исследования является анализ исторического развития бионического подхода в архитектуре, понимание следственно-причинных связей бионических принципов и форм современных зданий и других объектов.

Задачи исследования: выявление в работах архитекторов ключевых моментов, повлиявших на формирование бионического подхода; определение основных бионических принципов; разработка графической схемы развития бионической концепции в архитектуре.

## 2. Материалы и методы

Исследование основано на обзоре литературы, включающим исторические источники, современную практику, и также визуальный анализ архитектурных объектов. Был использован метод обобщения и структурирования полученной информации.

Исторический анализ предполагает выстраивание логики развития данной теории, начиная с ее образования, учитывая современное понимание вопроса. Начиная со времен античности, проводится углубленное изучение ключевых фигур и течения, таких как Антонио Гауди, модернизм 20 века : Фрайя Отто, Ф. Канделлы, Советскую школу. Целью этого анализа является понимание эволюции подхода и ключевых событий в развитии бионики в архитектуре.

Рассмотрены современные архитектурные практики, использующие принципы бионики, такие как Сантьяго Калатрава, Захи Хадид, Ма Яносона. Анализ включает изучение направления действующих проблематик: комплексные вопросы в практике и теоретические вопросы, на основе текстов, научных статей, публикаций самих авторов и исследований по ним.

Следуя изученным источникам проведен выбор иллюстраций, для наглядного представления о бионическом подходе в архитектуре. Систематизация информации, согласно результатам исследования исторических и современных практик, позволяет структурировать взаимосвязи в эволюции направления бионики. Он включает в себя выстроенную организацию информации с выделением ключевых моментов. Этот шаг имеет решающее значение для стратегического понимания эволюции бионики в архитектуре. Выбор данной методологии основан на выстраивании стратегического понимания развития Бионического направления. Понимание стратегии развития бионики дает несколько принципиальных преимуществ. Это позволяет составить более четкую наглядную схему по развитию направления - логику междисциплинарной интеграции природы, как источника знания и вдохновения, в актуальное научное знание для пользы и применения в архитектуре. Так же это позволит консолидировать понимание современных вопросов, которые являются шагом для перспективных горизонтов развития.

## 3. Результаты и обсуждение

Бионика (биоморфность и биомиметика) в комплексном виде проявляется в творчестве знаменитого каталонского архитектора Антонио Гауди. Использование биморфизма как в общем объемно-пространственном подходе, так и в отдельных архитектурных и конструктивных элементах, используя их гармоничную интеграцию – это основа концептуального и языкового аппарата архитектора.

Наиболее ярким примером для анализа комплексного бионического подхода может быть рассмотрен интерьер нефа Базилики Саграда Фамилия с колоннадой и сводами – «каменного леса». Дизайн колонн, напоминающих деревья, обусловлен структурной

оптимизацией - ветвящиеся к сводам стержни позволяют нести большую нагрузку и перераспределять давление на конструкцию здания (рис. 1).

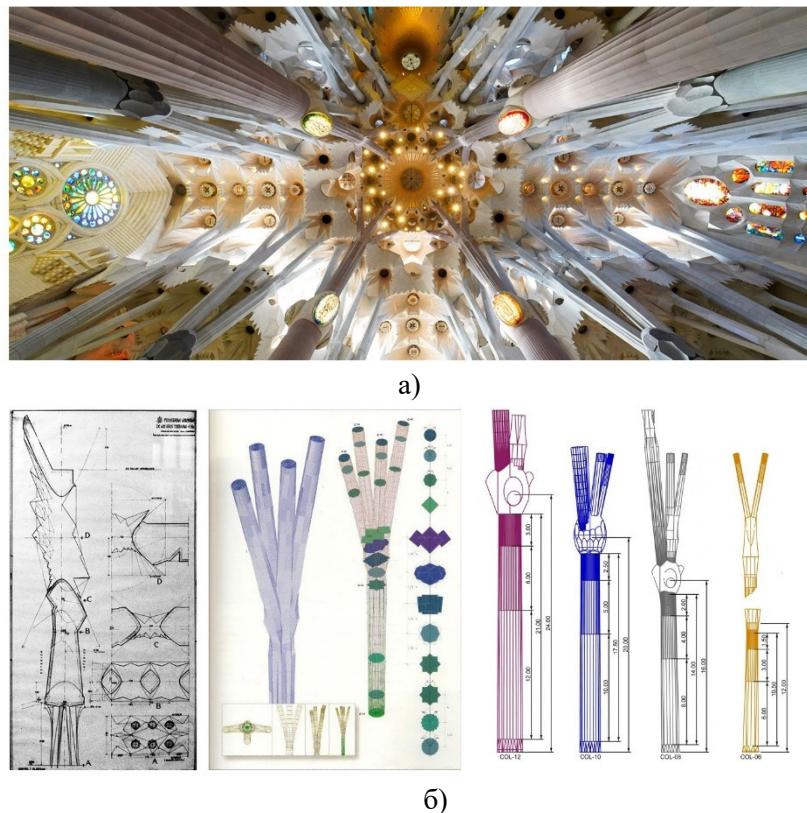


Рис. 1. Элементы интерьера нефа Базилики «Саграда Фамилия»

а.- колоннада и своды нефа; б.- конструкции колонн.(Источник: <https://blog.sagradafamily.org/>)

Fig. 1. Elements of the interior of the nave of the Sagrada Familia Basilica

a. - colonnade and vaults of the nave; b. - column designs. (Source: <https://blog.sagradafamily.org/en/>)

В сводах использованы модули с параболическими поверхностями, обусловленные производственной оптимизацией, так же являются конструктивными жесткими элементами с экономией материала за счет их пустотной пространственной конфигурацией. Колонны со сводами создают бионический композит - новое решение следуя замыслу архитектора - созданием конструктивного “цветущего” (за счет модулей сводов) леса как концепции для интерьера базилики, помимо общего экспрессивного эстетического эффекта - распределяя нагрузку - позволяя достигать новых пропорций в пространстве одновременно экономя материал. Учитывая многообразие биоморфности и конструктивной биомиметики феномена архитектуры А. Гауди, проблематику подхода можно описать как «композитность и экотектоника» (состоящую из разнообразных элементов объединённых в объёмно-конструктивную систему).

В XX веке с развитием научного знания математические и природные закономерности стали более концептуально взаимопроникающими понятиями, нежели в более ранних исторических периодах, когда использование геометрических закономерностей природных форм было направлено на эстетический анализ (определение золотого сечения). Важной частью нового подхода является трактат Дарси Томпсона - шотландского ученого, основателя математической биологии - «О росте и форме», изданной в Кембридже в 1917 году, приводящей в соответствие преобразования в живой природе с математическими формулами и законами физики (рис. 2).

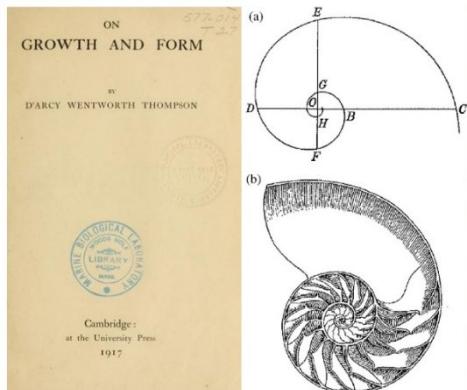


Рис. 2. Трактат «О росте и форме» Д. Томпсон 1917г.  
(Источник: <https://en.wikipedia.org/>)

Fig. 2. Treatise “On Growth and Form” by D. Thompson 1917  
(Source: <https://en.wikipedia.org/>)

В середине 20 века (50х годах) идеи математического биолога Алана Тьюринга являлись продолжением междисциплинарного слияния математики и природы, ставшими соответственно вопросами кибернетики и биоморфогенеза (рис. 3). «Он рассматривал природу как кодоносную, воплощающую процессы, полезные для машинного интеллекта. Возможно, он основывал свои морфогенетические исследования 1950-х гг. на вычислениях, вдохновленных биологией [4]. Его коды и расшифровки биологических объектов были задокументированы и сохранены для использования в компьютерном моделировании» [6].

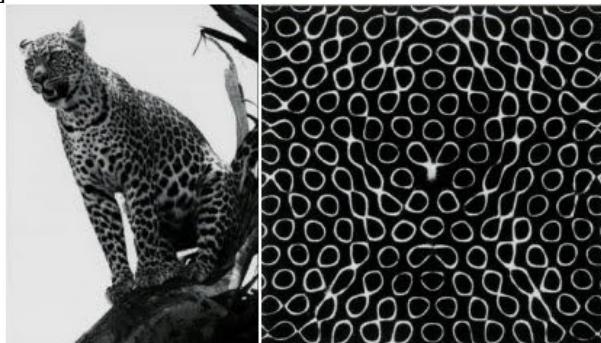


Рис. 3. Паттерны А. Тьюринга (Источник: <https://www.researchgate.net>)  
Fig. 3. A. Turing patterns (Source: <https://www.researchgate.net>)

13 сентября 1960 года состоялся первый международный симпозиум «Живые прототипы искусственных систем – ключ к новой технике» по бионике, официально закрепивший появление новой науки и сам термин – «Бионика», предложенный американским исследователем Дж. Стилом. Таким образом, бионика – это междисциплинарная наука на стыке между биологией и техникой, решающая инженерные задачи на основе опыта живой природы.

Развитие использования железобетона в 20 веке вместе с целостным, холистическим подходом математического проектирования бионических поверхностей привело к распространению тонких бетонных оболочек, демонстрирующих органическое, самонесущее распределение нагрузки [6].

Тонкостенные бетонные оболочки проектировались как самодостаточные несущие элементы (рис. 4). Например, таким объектом является “индустриальный виадук” итальянского архитектора и инженера Серджио Мусмечи, художественный замысел которого был заключен в создании оболочки с экспрессией распределения внутренних нагрузок. Кроме того, для анализа развития бионики середины 20 века представляют интерес самонесущие перекрытия – работы с оболочками испано-мексиканского

архитектора Феликса Канделлы. Эти архитектурные объекты имея свою логику: математическую конфигурацию кривизны, производства тонкостенных армированных бетонных оболочек и функционал общественных пространств. Так же с общим развитием модернистической пластики бетона появилась новая техника в архитектурном замысле, модернистическая экспрессия – терминал TWA американо-финского архитектора Ээро Саариена. Вернулись идеи артикулированных конструкций на основе понимания внутренних распределений нагрузок как конструктивной и эстетической логики, выраженных в системах ребристых перекрытий с изо - пластическим рисунком – шерстяная фабрика Gatti архитектора Пьера Луиджи Нерви [22].

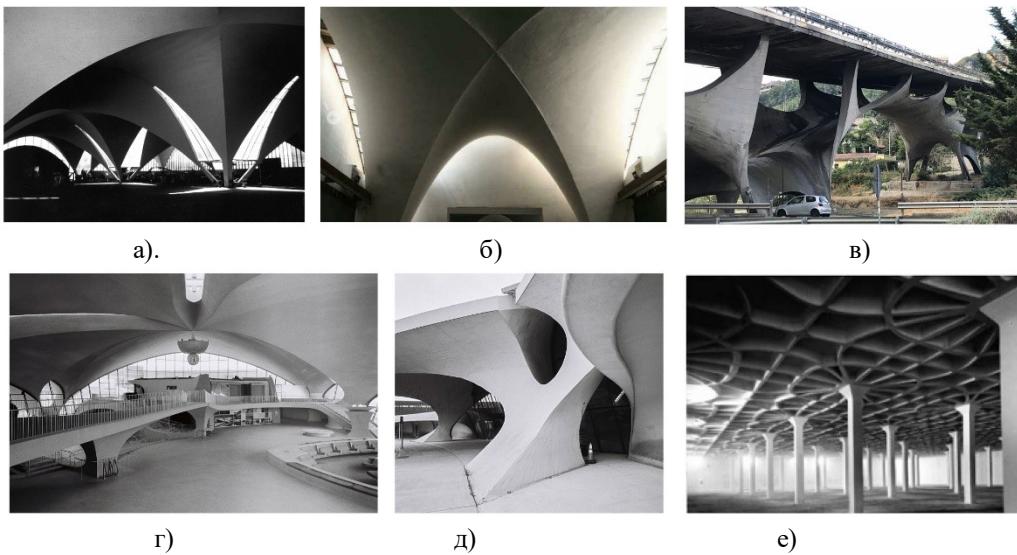


Рис. 4. Пластическое артикулирование конструкций и элементов из бетона  
а.- крыша ромовой фабрики Бакарди, арх. Ф.Канделла ; б.- здание Мексиканской фондовой биржи, арх. Ф. Канделла ; в.- Индустриальный виадук, арх. С. Мусмечи; г.- терминал TWA (интерьер), арх. Э. Саариен ; д.- терминал TWA (деталь экстерьера), арх. Э. Саариен ; е- шерстяная фабрика Gatti, арх. П. Л. Нерви. (Источник: <https://www.archdaily.cl>)

Fig. 4. Plastic articulation of structures and elements made of concrete  
a. - roof of the Bacardi rum factory, architect F. Candella; b. - building of the Mexican Stock Exchange, architect F. Candella; c. - Industrial viaduct, architect S. Musmeci; d. - TWA terminal (interior), architect E. Saarinen; e. - TWA terminal (exterior detail), architect E. Saarinen ; f. - Gatti wool factory, architect P. L. Nervi. (Source: <https://www.archdaily.cl>)

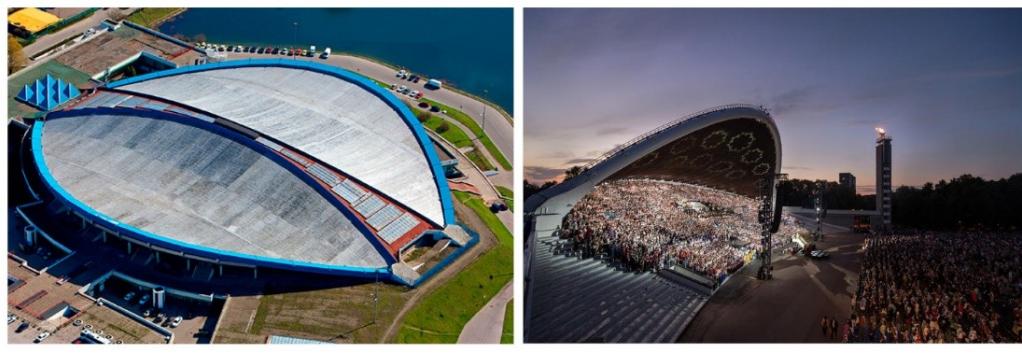
Помимо работ с бетонными конструкциями, архитекторы используют новые материалы и технологии на базе знаний о топологии, пространственных сетках, создавая качественно отличающиеся характеристики создаваемых ими объектов: геодезические купола Бахмистра Фуллера и, мягкие оболочки Фрая Отто (рис. 5).



Рис. 5. Геодезические купола и мягкие оболочки  
(Источник: <https://www.dezeen.com>)  
Fig. 5. Geodesic domes and soft shells.  
(Source: <https://www.dezeen.com/>)

Использование бионических подходов в архитектурной практике советской архитектуры было частью рационализации и конструктивной обоснованности новых

форм, что позволило решить конструктивные и эстетические вопросы крупных общественных проектов, поставив вопрос о фундаментальной утилитарности бионики в архитектуре, что в дальнейшем привело к идеи массового производства органических форм (рис. 6).



а)

б)

Рис. 6. Примеры бионики в СССР

а.- велотрек в Крылатском, арх. Н.И.Воронина, А.Г.Оспенников ; б.- эстрада певческого поля в Таллине, арх. А.Котли, Х.Сепманин. (Источник: <https://krylatskoe.com>)

Fig. 6. Examples of bionics in the USSR

a. - velodrome in Krylatskoye, architects N.I. Voronina, A.G. Ospennikov; b. - stage of the singing grounds in Tallinn, architects A. Kotli, H. Sepmann. (Source: <https://krylatskoe.com>)

Среди научных направлений, занимавшимися исследованиями и практической реализацией природных принципов в строительстве и архитектуре, следует выделить немецкую исследовательскую группу «Биология и строительство» под руководством Фрая Отто (1925 – 2015), а также группу советских специалистов, которую объединил и возглавил Юрий Сергеевич Лебедев (1921 – 1992). Одним из фундаментальных идей Ю.С. Лебедева была работа над проблематикой целостности бионики [7,8].

В 2004 году выходит книга архитектора и теоретика Детлефа Мертиса «Биоконструктивизм» в развитие идей стратегического использования материалов и бионических подходов в архитектуре. Книга, написанная на основе анализа работ Фрая Отто, обозначает новое направление в архитектуре.

Слияние промышленного производства с бионическими принципами, привело к появлению новой концепции в архитектуре - биотек. Основа концепции биотека представляют собой симбиоз биологического ориентирования с эффективностью промышленного массового производства.

Сантъяго Калатрава является пионером в этом движении [9]. Он использует свой особый подход к сегментированию элементов дизайна для создания органических форм, которые неразрывно связаны с процессами промышленного производства. Благодаря стратегическому использованию сегментированной геометрии, архитектурные композиции С. Калатравы служат примером принципов биотехнологии, где повторение и модульность облегчают не только создание динамических органических структур, но также масштабируемость и эффективность, необходимые для индустриализации изготовления целостного архитектурного объема.

Центральным элементом методологии С. Калатравы является признание того, что сегментация архитектурных форм отражает эффективность промышленных производственных процессов [10]. Каждый сегмент, тщательно спроектированный и изготовленный заранее, способствует общей согласованности и структурной целостности здания, одновременно оптимизируя производственный процесс. Этот акцент на сегментацию и промышленное массовое производство не только позволяет реализовать сложные органические формы, но и способствует ритмической пространственной организации в проектах С. Калатравы. Повторение сегментированных элементов создает ощущение плавности и движения, напоминающее природные формы, элементы живых организмов (рис. 7).

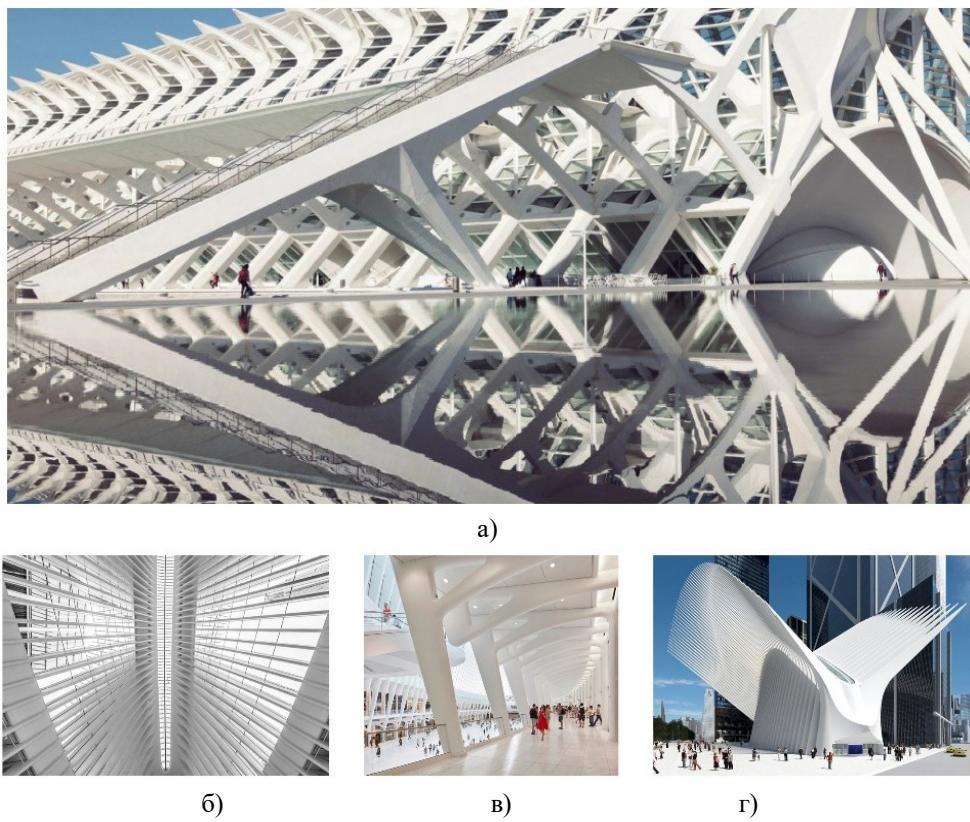


Рис. 7. Сегментированная биоморфология архитектуры Сантьяго Калатравы  
а.- Музей науки принца Филиппа; б.- атриум Окулуса ; в.- галерея Окулуса ; г.- экстерьер  
Окулуса. (Источник: <https://calatrava.com/>)  
Fig. 7. Segmented biomorphology of Santiago Calatrava's architecture  
a.- Prince Philip Science Museum; b.- Oculus atrium; c.- Oculus gallery; d.- Oculus exterior.  
(Source:<https://calatrava.com/>)

С развитием компьютерных программ в области проектирования стал развиваться биоморфный экоподход. MAD Architects, используя биофильтные фасады и биоморфные формы, создают среду, гармонирующую с природой и отвечающую современным архитектурным требованиям. Vincent Callebaut Architectures, имитируя природные экосистемы и отдавая приоритет экологической устойчивости, демонстрируют целостный подход к устойчивой архитектуре [14,15]. Heatherwick Studio с помощью комбинаторных методов, таких как вертикальные сады и зеленые крыши, переосмысливают городские ландшафты, способствуя биоразнообразию и устойчивому образу жизни (рис. 8).

К актуальным вопросам современной бионики можно отнести применение параметрики, кодирования в проектном процессе, а также использование современных инструментов в создании и конструировании и производстве 3д печати, роботов и т.д. [20, 21].

Как примеры развития концепции бионики на основе актуального теоретического и технологического контекста можно рассмотреть несколько актуальных аспектов: эмерджентность, тектонизм.



а)

б)

в)

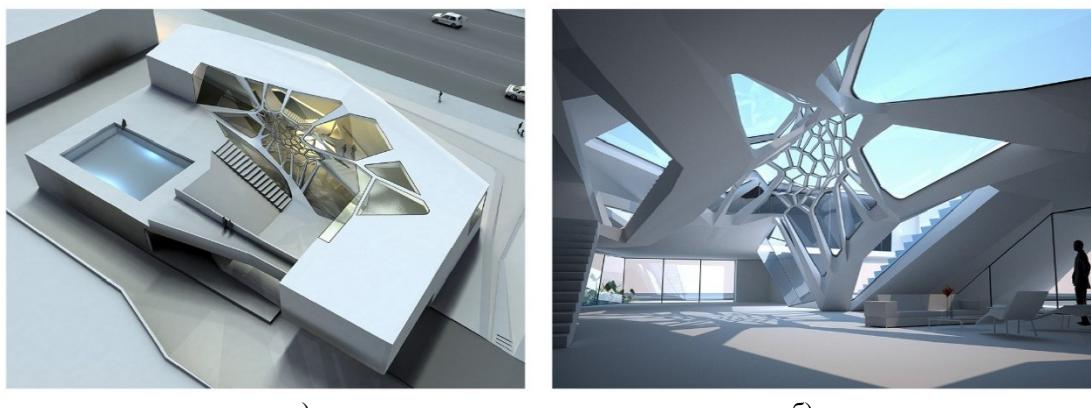
Рис. 8. Биоморфный экоподход

а.- концепция “Париж 2050” арх. В. Каллебо; б.- Олимпийский парк в Цюйчжоу, арх. М. Янсон; в.- комплекс “1000 деревьев”, арх. Т.Хедервик. (Источник: <https://vincent.callebaut.org/>, <http://www.i-mad.com>, <https://www.heatherwick.com/>)

Fig. 8. Biomimetic eco-approach

а.- concept “Paris 2050”, architect V. Callebaut; b.- Olympic Park in Quzhou, architect M. Yansong; c. - complex “1000 trees”, architect T. Heatherwick. (Sources: <https://vincent.callebaut.org/>, <http://www.i-mad.com>, <https://www.heatherwick.com/>)

Эмерджентность (emergence - появление) - (в контексте биоконструктивизма) концепция синтезирования на стыке биологии и теории систем. Она выражена в работах архитекторов Тома Вискомба, Рональда Снукса и может быть сформулирована на примере практики Тома Вискомба как последовательные соотношения между системами здания в направлении возникающей целостности более высокого порядка, сохраняющей при этом перформативную раздельность этих систем (рис. 9) [22].



а)

б)

Рис. 9. Биоморфная эмерджентность на примере структурного витража Cell House, арх. Том Вискомб; а. - экстерьер; б.-интерьер (Источник: <https://tomwiscombe.com/CELL-HOUSE>)

Fig. 9. Biomorphic emergence using the example of structural window in Cell House, architect Tom Wiscombe; a. - exterior; b.- interior (Source: <https://tomwiscombe.com/CELL-HOUSE>)

Тектонизм (в контексте параметрики) – направление, разрабатываемое компанией Zaha Hadid Architects, под руководством со-основателя компании, архитектора Патрика Шумахера. Он представляет собой интегрированный объёмно - конструктивный подход, артикулирующий структурными аспектами в создании органической экспрессии и инновационных решений (рис. 10) [23, 24].



а) б)

Рис. 10. Параметрический тектонизм Zaha Hadid Architects на примере экзоскелета One Thousand Museum а. - общий вид; б.- деталь экстерьера. (Источник: <https://www.zaha-hadid.com/>)

Fig. 10. Parametric tectonism by Zaha Hadid Architects on the example of the One Thousand Museum exoskeleton a. - general view; b. - exterior detail. (Source: <https://www.zaha-hadid.com/>)

Биомиметика и роботизированное производство организовано в работах института вычислительного проектирования и строительства Штутгартского университета под руководством проф. Ахима Менгеза [25]. Он использует конструкции из углеродного волокна и производство шелковых нитей арахнидами, воспроизводя процесс через вычислительные методы - кодирование (рис. 11) [26].

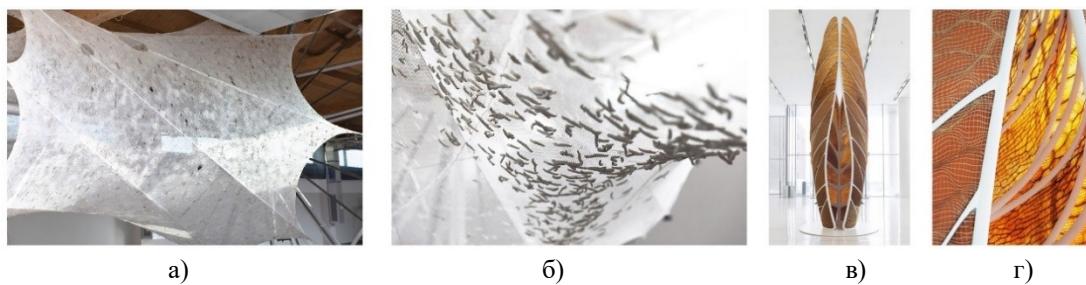


а) б)

Рис. 11. Биомиметика и роботизированное производство на примере работ А. Менгеза  
а.- деревянный павильон BUGA ; б.- исследовательский павильон ICD/ITKE.  
(Источник: <http://www.achimmenges.net/>)

Fig. 11. Biomimetics and robotic production on the examples of works by A. Menges  
A - BUGA wooden pavilion; b. - ICD/ITKE research pavilion.  
(Source: <http://www.achimmenges.net/>)

Междисциплинарный подход архитектора Нери Оксман сосредоточен на интеграции биоорганизмов, поведенческом программировании, органической печати [27]. Благодаря особому видению ее работы расширяют общее понимание архитектурной проблематики бионики (рис. 12).



а)

б)

в)

г)

Рис. 12. Поведенческое программирование и биопечать на примере работ Н.Оксман  
а.- шелковый павильон; б.- шелкопряды; в.- “Агуахоя” г. - деталь “водяного листа”  
(Источник: <https://oxman.com/>)

Fig. 12. Behavioral programming and bioprinting on the examples of works by N. Oxman  
a.- silk pavilion; b.- silkworms; c.- “Aguahoja” d.- detail of the “water leaf” (Source:  
<https://oxman.com/>)

Одной из основных особенностей современной бионики является возможность применять более развитый чем ранее аппарат моделирования, симуляции и вычисления бионических процессов [28]. При этом, основываясь на рационалистическом фундаменте подхода, можно увидеть взаимосвязь между идеей развития продуктивности инструментария и фактической необходимостью углубления понимания бионической теории [29]. Таким образом, создается запрос на развитие теоретического и практического знания бионики и знание о его применимости в архитектурной практике как катализатора развития гармонизационного процесса и эффективных архитектурных решений. [30, 31].

Проведенный анализ основан и подтверждает следующие основные бионические принципы: биофилия, биомиметика, биоморфизм (рис. 13).



Рис. 13. Бионические принципы (Источник: иллюстрация авторов)  
Fig. 13. Bionic principles (Source: illustration by the authors)

Общая канва развития бионики является гармонизацией архитектуры и природы, развитие концептуального знания открывают новые горизонты, уровни для данной гармонизации, становящейся все более «всебъемлющей». Данная многоуровневость бионической гармонизации позволяет расширить аппарат для решения общих архитектурно-эстетических задач, что проводит параллель между рационализмом и культурной практики архитектуры [32]. Бионический подход в архитектуре эволюционировал из эстетико-морфологического аспекта в рационалистический подход, который с развитием научного знания стал междисциплинарным подходом. Из вопросов творческой экспрессии с развитием современного аппарата анализа архитектуры методология бионики стала стратегией принятия эффективных решений [33].

С развитием индустрии архитектуры и запросов общества бионический подход стал использоваться как комплексный эко-язык, позволяющий воспроизводить природные

формы и становиться новым культурным слоем в архитектурной среде. Экспериментальные и инновационные проекты актуальных вопросов позволяют понять актуальную повестку бионической концепции. Графическая схема является иллюстрацией развития бионической концепции в архитектуре, с выделением взаимосвязей при развитии теории и приход к актуальным вопросам бионики – рис 14.

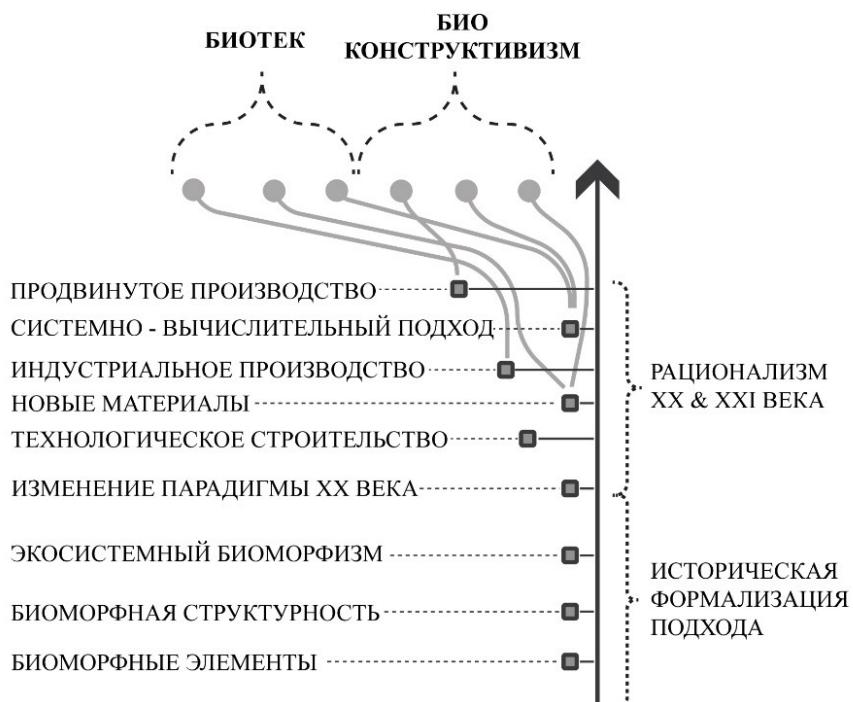


Рис. 14. Схема развития бионики (Источник: иллюстрация авторов)  
Fig. 14. Bionic principles (Source: Illustration by the authors)

#### 4. Заключение

1. В результате выполнения исследования были изучены основные особенности бионики, проявление их в работах архитекторов древности и современных мастеров.
2. Выявлены основные бионические принципы: биофилия, биомиметика, биоморфизм. Биофилия предполагает использование природных элементов в архитектуре. Биомиметка направлена на применение природных стратегий в архитектуре, для проектирования более качественных зданий. Биоморфизм предполагает внедрение природных форм, паттернов и текстур в архитектуру зданий, сооружений.
3. Предложена общая графическая канва развития бионики в виде взаимосвязанной схемы с привязкой к историческим периодам развития искусства.

#### Список литературы / References

1. Айдарова Г. Н., Краснобаев И. В. Дерево в архитектуре прибрежных территорий исторического центра Казани // Жилищное строительство. – 2019. – № 1-2. – С. 30-34. – [Aidarova G. N., Krasnobaev I. V. A tree in the architecture of the coastal territories of the historical center of Kazan // Housing construction. – 2019. – No. 1-2. – P. 30-34.] DOI 10.31659/0044-4472-2019-1-2-30-34. – EDN YYTEQX.
2. Zakirova J., Khusnutdinova S. The problems of formation and conservation of the green frame (green carcass) of the satellite city (on the example of Zelenodolsk) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Kazan, September 27–29, 2017. Vol. 107. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012139. – DOI 10.1088/1755-1315/107/1/012139. – EDN XXGENV.
3. Воробьев А. Е., Воробьев К. А. Бионическое обоснование современных технологий// Вестник Астраханского государственного технического

- университета. – 2020. – № 1(69). – С. 44-57. [Vorobyov A. E., Vorobyov K. A. Bionic substantiation of modern technologies// Bulletin of the Astrakhan State Technical University. – 2020. – № 1(69). – P. 44-57.] – DOI 10.24143/1812-9498-2020-1-44-57. – EDN CYXNUQ.
4. Томченко Е. М., Мухнурова И. Г. Архитектурно-строительная бионика// Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 года / Редколлегия: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2020. – С. 171-173. [Tomchenko E. M., Mukhnurova I. G. Architectural and construction bionics// Youth and Science: actual problems of fundamental and applied research: Materials of the III All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. In 3 parts, Komsomolsk-on-Amur, April 06-10, 2020 / Editorial Board: E.A. Dmitriev (ed.) [et al.]. Part 2. – Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2020. – P. 171-173.] – EDN UOXXCO.
5. Уморина Ж. Э. Цифровой морфогенез бионической архитектуры // Инновации в социокультурном пространстве: Материалы XVI Международной научно-практической конференции, Благовещенск, 20 апреля 2023 года. Том Часть II. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2023. – С. 50-52. [Umorina J. E. Digital morphogenesis of bionic architecture // Innovations in the socio-cultural space: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference, Blagoveshchensk, April 20, 2023. Volume Part II. – Blagoveshchensk: Amur State University, 2023. – P. 50-52.] – DOI 10.22250/9785934934096\_50. – EDN ZZDMDQ.
6. Козлов Д. Ю., Лебедев Ю.С. и становление архитектурной бионики как нового научного направления // Бионика - 60 лет. Итоги и перспективы : Сборник статей Первой Международной научно-практической конференции, Москва, 17–19 декабря 2021 года / Под редакцией А.П. Карпенко. – Москва: Ассоциация технических университетов, 2022. – С. 66-77. [Kozlov D. Yu., Lebedev Yu.S. and the formation of architectural bionics as a new scientific direction // Bionics - 60 years. Results and prospects: Collection of articles of the First International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 17-19, 2021 / Edited by A.P. Karpenko. – Moscow: Association of Technical Universities, 2022. – P. 66-77] – DOI 10.53677/9785919160496\_66\_77. –EDN ZJYDPM.
7. Лебедев Ю.С. Архитектура и бионика Стройиздат. Москва. 1990. – С. 267 [Lebedev Yu.S. Architecture and Bionics Stroyizdat. Moscow. 1990. – 267 p.]
8. Чмир Ю. Э. Современное состояние и перспективы развития архитектурной бионики// Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2018. – Т. 21, № 4(70). – С. 61-68. [Chmir Yu. E. The current state and prospects of development of architectural bionics// Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). - 2018. – vol. 21, No. 4(70). – P. 61-68.] – EDN YZTDDV.
9. Лангольф А. А. Архитектурная бионика в работах Сантьяго Калатравы // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: Материалы международной научно-практической конференции. Сборник статей, Москва, 02–06 апреля 2018 года. – Москва: Московский архитектурный институт (государственная академия), 2018. – С. 119-121. [Langolf A. A. Architectural bionics in the works of Santiago Calatrava // Science, education and experimental design. Proceedings of the MARXI: Proceedings of the international scientific and practical conference. Collection of articles, Moscow, 02-06 April, 2018. – Moscow: Moscow Architectural Institute (State Academy), 2018. – P. 119-121.] – EDN FHDVRW.
10. Shuaizhong Wang, Toni Kotnik, Joseph Schwartz, Ting Cao, Equilibrium as the common ground: Introducing embodied perception into structural design with graphic

- statics, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 11, Issue 3, 2022, P. 574-589, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.01.001>
11. Окунская О. В. Серяков В. А. Анализ формообразования в стиле биоморфизм// *Gaudeamus Igitur.* – 2015. – № 1. – С. 116-117 [Okunskaya O. V. Seryakov V. A. Analysis of morphogenesis in the style of biomorphism // *Gaudeamus Igitur.* – 2015. – No. 1. – P. 116-117]. – EDN UIVJTH.
12. Yannis Zavoleas, Patterns of nature: Bio-systemic design thinking in meeting sustainability challenges of an increasingly complex world, *Developments in the Built Environment*, Volume 7, 2021, 100048, ISSN 2666-1659, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100048>
13. Рагужина О. И., Абдулина А. М. Бионика в архитектуре как реализация экологических концепций современности// Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2022. – № 5(42). – С. 50-56. [Raguzhina O.I., Abdulina A.M. Bionics in architecture as the implementation of environmental concepts of modernity // Education and science in the modern world. Innovation. – 2022. – No. 5(42). – P. 50-56.]– EDN JNAHJM.
14. Кишко Е. Д., Предохина О. А. Архитектурная бионика: целесообразность использования природных аналогов в архитектурных сооружениях// Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2018. – Т. 2. – С. 117-121 [Kishko E. D., Predokhina O. A. Architectural bionics: the feasibility of using natural analogues in architectural structures // New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU. – 2018. – Vol. 2. – P. 117-121]. – EDN XPCUNN.
15. Быкова Г. И., Иванова Е. И., Косточкина О. В. Использование принципов бионики в архитектуре // Вестник Московского информационно-технологического университета - Московского архитектурно-строительного института. – 2021. – № 3. – С. 15-18. –[Bykova G. I., Ivanova E. I., Kostochkina O. V. Using the principles of bionics in architecture // Bulletin of Moscow Information Technology University - Moscow Architectural and Construction Institute. – 2021. – No. 3. – P. 15-18.] DOI 10.52470/2224669X\_2021\_3\_15. – EDN CTLUYH.
16. Weijie Zhong, Torsten Schroeder, Juliette Bekkering, Designing with nature: Advancing three-dimensional green spaces in architecture through frameworks for biophilic design and sustainability, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 12, Issue 4, 2023, P. 732-753, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.03.001>.
17. Стрижак А. В., Казакова Н. Ю. К вопросу о происхождении и использовании термина "биоморфизм"/ Дизайн и технологии. – 2020. – № 78(120). – С. 14-21. [Strizhak A.V., Kazakova N. Y. On the question of the origin and use of the term "biomorphism"/ Design and technology. – 2020. – № 78(120). – P. 14-21]– EDN KFQJHC.
18. Diana A. Chen, Leidy E. Klotz, Brandon E. Ross, Mathematically Characterizing Natural Systems for Adaptable, Biomimetic Design, *Procedia Engineering*, Volume 145, 2016, P. 497-503, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.031>.
19. Louis Vitalis, Natasha Chayaamor-Heil, Forcing biological sciences into architectural design: On conceptual confusions in the field of biomimetic architecture, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 11, Issue 2, 2022, P. 179-190, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.001>.
20. Saurav Dixit, Anna Stefańska, Bio-logic, a review on the biomimetic application in architectural and structural design, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 14, Issue 1, 2023, 101822, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101822>
21. Корниенко С. В. Биомиметика: идеи, вдохновленные природой // Социология города. – 2021. – № 4. – С. 27-38. [Kornienko S. V. Biomimetics: ideas inspired by nature // Sociology of the city. - 2021. – No. 4. – P. 27-38.]– EDN NEYSLW.
22. Wiscombe T., Zellner P., Emergent: Structural Ecologies. Los Angeles: Aacdu Publishing 2009.

23. Schumacher P. Tectonism: Architecture for the 21<sup>st</sup> Century London: Images Publishing 2023.
24. Добрицына И. А. Концепции биоморфизма и параметризма в современной архитектуре: проблемы и перспективы // Academia. Архитектура и строительство. – 2019. – № 3. – С. 51-57. [Dobritsyna I. A. Concepts of biomorphism and parametrism in modern architecture: problems and prospects // Academia. Architecture and construction. – 2019. – No. 3. – P. 51-57.] – DOI 10.22337/2077-9038-2019-3-51-57. – EDN JKQMUD.
25. Menges, “Biomimetic design processes in architecture: Morphogenetic and evolutionary computational design,” Bioinspiration and Biomimetics, vol. 7, no. 1, 2012. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015003>
26. Wang, J. Application of bionics in urban and architectural design / J. Wang, X. Sun, M. V. Syschik // New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU. – 2020. – Vol. 2. – P. 49-55. – EDN NMYGRM.
27. Витюк Е. Ю., Уморина Ж. Э. Природные технологии как новый принцип формообразования в архитектуре// Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 55-64. [Vityuk E. Yu., Umorina J. E. Natural technologies as a new principle of shaping in architecture// Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2018. – Vol. 20, No. 4. – P. 55-64.] – DOI 10.31675/1607-1859-2018-20-4-55-64. – EDN XWCDAL.
28. Воронова А. А., Сагалаев А. В. Бионика в современной архитектуре // Строительство и архитектура - 2015 : материалы международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 года / ФГБОУ ВПО "Ростовский государственный строительный университет", Союз строителей южного федерального округа, Ассоциация строителей Дона. Том 4. – Ростов-на-Дону: Редакционно-издательский центр РГСУ, 2015. – С. 116. [Voronova A. A., Sagalaev A.V. Bionics in modern architecture // Construction and Architecture 2015 : materials of the International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, November 26-27, 2015 / Rostov State University of Civil Engineering, Union of Builders of the Southern Federal District, Association of Builders of the Don. Volume 4. – Rostov-on-Don: Editorial and Publishing Center of the Russian State University of Economics, 2015. – P. 116.] – EDN VARJPR.
29. Уморина, Ж. Э. Природоподобные конструкции бионической архитектуры // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2017. – Т. 3. – С. 378-382. [Umorina, J. E. Nature-like constructions of bionic architecture // New ideas of the new century: proceedings of the international scientific conference of the Federal State University of Economics. – 2017. – Vol. 3. - P. 378-382.] – EDN YKOXWV.
30. Vincent JFV, Bogatyreva OA, Bogatyrev NR, Bowyer A, Pahl AK. Biomimetics: Its practice and theory. J R Soc Interface 2006;3(9):471–82. doi: <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>.
31. Комарова А. А., Клименко П. Я. Биомиметические принципы в архитектурном проектировании // Архитектон: известия вузов. – 2021. – № 2(74). [Komarova A. A., Klimenko P. Ya. Biomimetic principles in architectural design // Architecton: news from universities. – 2021. – № 2(74).] – DOI 10.47055/1990-4126-2021-2(74)-3. – EDN DPRCVM.
32. Shaimaa El-Ghobashy, Gihan Mosaad, Nature Influences on Architecture Interior Designs, Procedia Environmental Sciences, Volume 34, 2016, P. 573-581, ISSN 1878-0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.050>.
33. Vinicius Mizobuti, Luiz C.M. Vieira Junior, Bioinspired architectural design based on structural topology optimization, Frontiers of Architectural Research, Volume 9, Issue 2, 2020, P. 264-276, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j foar.2019.12.002>.

### Информация об авторах

**Прокофьев Евгений Иванович**, кандидат архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация

*E-mail: zhenya.prokofiev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0609-7176*

**Серегин Дмитрий Владимирович**, архитектурная компания CROX, Шанхай, Китай, директор по архитектурному проектированию и дизайну.

*E-mail: seregindmitryarchitect@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7448-8891*

### Information about the authors

**Evgenii I. Prokofiev**, candidate of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering

*E-mail: zhenya.prokofiev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0609-7176*

**Dmitry V. Seregin**, architectural company “CROX”, Shanghai, China, director of architecture & design

*E-mail: seregindmitryarchitect@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7448-8891*



УДК: 730

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.19

EDN: RPRCOO

## Советская монументальная скульптура в городском пространстве Казани

Л.Ш. Сайфуллина<sup>1</sup>, Н.Р. Сиразеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация;

**Аннотация:** Постановка задачи. Феномен советской монументальной скульптуры довольно активно проблематизируется в современном архитектурном и искусствоведческом дискурсе и входит в сферу научных интересов многих исследователей. Статья посвящена комплексному рассмотрению советской монументальной скульптуры Казани как художественного и градостроительного феномена. Объект исследования составляют наиболее значимые для городской среды монументы, отличающиеся высокохудожественной пластикой, участвующие в организации пространств и формировании определённых семантических полей. При этом особый акцент делается на скульптурный компонент, интегрированный в сложившуюся градостроительную ситуацию исторического центра. Целью статьи является установление общих универсализемых закономерностей в развитии советской монументальной скульптуры Казани. Задачи исследования: необходимо охарактеризовать специфику взаимодействия монументов с их архитектурным окружением; проанализировать формально-пластические свойства произведений скульптуры; рассмотреть идейное и жанрово-тематическое разнообразие советской монументальной скульптуры Казани.

**Результаты.** Рассмотрены знаковые объекты казанской монументальной пластики советского периода, выделены общие закономерности в развитии данного направления архитектурно-художественной мысли, также описаны некоторые индивидуальные особенности монументов. Кроме того, в каждом отдельном случае произведена идеино-смысловая реконструкция в свете урбанистического концепта *genius loci*. В рамках ретроспективного исследования немаловажным аспектом стал сам художественный процесс в его соотношении с парадигмой соалистического реализма.

**Выводы.** На основании проведённого исследования представляется возможным классифицировать советскую монументальную скульптуру Казани по четырём основным параметрам: композиционно-градостроительная роль, характер статуарной пластики, жанрово-тематическая принадлежность, семантическая направленность.

**Ключевые слова:** скульптура, монумент, памятник, мемориальный комплекс, архитектурная среда, синтез архитектуры и скульптуры, композиционная доминанта

**Для цитирования:** Сайфуллина Л.Ш., Сиразеев Н.Р. Советская монументальная скульптура в городском пространстве Казани // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 221-242, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.19, EDN: RPRCOO

# Soviet monumental sculpture in the urban space of the city of Kazan

L.Sh. Saifullina<sup>1</sup>, N.R. Sirazeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* The phenomenon of Soviet monumental sculpture is quite actively problematized in modern architectural and art historical discourse and is included in the sphere of scientific interests of many researchers. The article is devoted to a comprehensive review of the Soviet monumental sculpture of Kazan as an artistic and urban planning phenomenon. The object of the research is represented by the most significant monuments for the urban environment, characterized by highly artistic plasticity, involved in the organization of spaces and the formation of certain semantic fields. At the same time, special emphasis is placed on the sculptural component integrated into the current urban planning situation of the historical center. *The aim of the article* is to establish general universalizable patterns in the development of Soviet monumental sculpture in Kazan. *Research objectives:* it is necessary to characterize the specifics of the interaction of monuments with their architectural environment; to analyze the formal and plastic properties of works of sculpture; to consider the genre and thematic diversity of the Soviet monumental sculpture of Kazan.

*Results.* The iconic objects of the Kazan monumental sculpture of the Soviet period are considered, general patterns in the development of this direction of architectural and artistic thought are highlighted, and some individual features of the monuments are also described. In addition, in each individual case, an ideological and semantic reconstruction was carried out following the urban concept of *genius loci*. In the framework of a retrospective study, an important aspect was the artistic process itself in its relation to the paradigm of socialist realism. *Conclusions.* Based on the conducted research, it seems possible to classify the Soviet monumental sculpture of Kazan according to three main parameters: the compositional and urban planning role, the nature of statuary plasticity, genre and thematic affiliation.

**Keywords:** sculpture, monument, statuary, memorial complex, architectural environment, synthesis of architecture and sculpture, compositional dominant

**For citation:** Saifullina L.Sh., Sirazeev N.R. Soviet monumental sculpture in the urban space of the city of Kazan // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 221-242, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.19, EDN: RPRCOO

## 1. Введение

К различным аспектам соцреалистической скульптуры регулярно обращается как отечественная, так и зарубежная наука, объектом исследования которой становится монументальное искусство на всём постсоциалистическом пространстве.

Предпосылки формирования традиций социалистического реализма в советском искусстве генетически восходят к ленинскому плану монументальной пропаганды. Как следствие, магистральным художественным методом в 1920-е гг. становится советский авангард. Вопросу генезиса советской монументальной пластики посвящено исследование О. Ю. Юрьевой [1]. Процесс реализации плана монументальной пропаганды на раннем этапе анализируется в работе А. О. Котломанова, рассматривающего модернистский опыт в качестве «активной апелляции художника к публике» [2].

В первой половине 1930-х гг. в манере соцреализма происходят пластические трансформации, связанные с процессами идеологического порядка. Ввиду сталинского постановления «О перестройке литературно-художественных организаций» от 23 апреля 1932 года и последующей смены риторики понятие «социалистический реализм» начинает противопоставляться термину «авангард». Компаративный анализ

скульптурной пластики 1920-х и 30-х гг. проводится в научном труде Е. Ю. Лекус [3]. Именно сталинский период был ознаменован «становлением культа личностей двух ключевых фигур советской эпохи — В. Ленина и И. Сталина» [4]. В эти годы особое значение приобретают иконографические принципы, использовавшиеся при создании образов вождей и революционеров, а также изобразительные приёмы, позволяющие переводить искусство в плоскость идеологии и идентифицировать феномен вождизма. Кроме того, 1930-е – 1950-е гг. характеризуются процессом тиражирования монументов, описанным в монографии В. В. Гейль [5]. Исследователь выявляет атрибутику подобного скульптурного компонента, обозревая региональные образцы [6].

В 1960-е гг. в советском монументальном искусстве намечается модернистский поворот, актуализирующий проблему взаимодействия скульптуры с природным ландшафтом и городской средой [7]. Начиная с 1960-х гг. наблюдается тяготение городских монументов к пластическому обобщению и динамике геометрических форм, рассматривающих в историческом срезе советский художественный процесс, анализирующих формально-выразительные особенности монументальной скульптуры Казани [8]. Особое значение в рассматриваемый период приобретает коммеморативная скульптура и мемориальные комплексы, поскольку именно в годы хрущёвской оттепели формируется официальный нарратив о событиях войны [9]. Идеологический аспект в советской монументальной скульптуре 1950-80-х гг., а также «связь соцреализма с классической традицией» рассмотрены в исследовании К. П. Карагоды [10].

Следует отметить также работы, посвящённые отдельным представителям советской монументальной скульптуры и позволяющие рассматривать данный феномен в порядке от частного к общему [11-13]. А. К. Флорковская особое внимание уделяет композиционному симбиозу скульптурной «фазы» и постамента, являющемуся ключевым фактором формирования световоздушной среды и архитектурно-скульптурного взаимодействия. По её мнению, советский период характеризуется «общим направлением поисков» зодчих и скульпторов. Элементом автореферентного дискурса в рамках настоящего исследования становится работа, посвящённая общим вопросам синтеза архитектуры и скульптуры [14].

В трудах зарубежных исследователей соцреалистические монументы рассматриваются на всём постсоциалистическом пространстве в контексте коммунистического наследия [15-17]. Монументальная скульптура данного периода становится опорным элементом памятного ландшафта и переживает на сегодняшний день процесс реконтекстуализации [18, 19]. Центральным понятием в этих исследованиях становится культурная память города. В работе А. Ассманна монументальная пластика социалистического периода рассматривается как проявление больших нарративов, ей противопоставляется постмодернистское явление «контрмонумента», впервые описанное Джеймсом Э. Янгом [20]. Подобные отклонения от идеологического партийного диктата, имевшие место в скульптурной пластике 1960-70-х гг., по замечанию Б. Хлупека, расценивались в качестве упаднического жеста [21]. А. Томашевич определяет соцреалистические монументы не только как средство пропаганды и дидактического воздействия, но и как объекты, обозначавшие «места укрепления колективной идентичности» [22].

Среди казанских исследователей, занимавшихся вопросами советской монументальной скульптуры на материале своего города, можно отметить уже упомянутых Т. Н. Кривошееву и Д. Д. Хисамову. Также необходимо сказать о вкладе собственно казанской архитектурной школы в изучение модернистских объектов города [23] и общих принципов интеграции скульптуры в городское пространство [24]. С. Хуснутдинова относит созданные предшествующими поколениями объекты материальной среды, в том числе скульптурный компонент, к «базовым» факторам формирования городских пространств [25].

Исходя из степени изученности вопроса определён объект исследования — советская монументальная скульптура города Казани. Цель работы сводится к выявлению основных тенденций в развитии казанской монументальной пластики советского периода. К основным задачам следует отнести рассмотрение

композиционного значения монументов в городской среде, описание их формально-пластических особенностей, а также определение жанровой природы и идейного своеобразия.

## 2. Материалы и методы

Исследование построено на анализе литературных источников, посвящённых вопросам советской монументальной скульптуры и соцреалистическому художественному процессу, а также авторских наблюдениях. В качестве основополагающего подхода исследование использует историко-генетический метод, позволяющий охарактеризовать в историческом аспекте рассматриваемый феномен, проследить причинно-следственную обусловленность связанных с ним процессов. Кроме того, следует выделить сопутствующие методы, составляющие методологическую базу настоящей работы.

1. Метод сравнительного анализа используется в целях установления типологической дифференциации советской монументальной скульптуры Казани, выявления основных пластических и семантических особенностей внутри каждой категории;

2. Герменевтический метод позволяет формулировать идеально-смыслоное содержание каждого отдельного монумента, определять его роль в формировании историко-культурной идентичности места;

3. Дедуктивный метод используется при средовом подходе к анализу монументов;

4. Индуктивный метод позволяет производить анализ в порядке от монумента к архитектурной среде.

## 3. Результаты и обсуждение

Произведения монументальной скульптуры являются важнейшими структурными элементами пространственного каркаса города. Будучи результатом совместного труда зодчего и скульптора, монумент участвует в организации городского пространства иreprезентации определённых художественных и семиотических кодов, способствуя тем самым формированию неповторимого духа места. Ввиду этого в современной архитектурной проблематике, теоретизирующей механизмы взаимодействия скульптуры с городским пространством, существуют все резоны исходить из высказывания А. Э. Бринкмана о том, что «монумент ищет опоры в архитектуре»<sup>1</sup>.

Предпосылки к возникновению советской монументальной пластики в классическом понимании этого явления необходимо связывать, прежде всего, с осуществлением ленинского плана монументальной пропаганды, в системе которой скульптура должна была служить идеологическим паттерном, транслирующим соответствующие нарративы и установки и способствующим адаптации человека к новой социально-экономической парадигме. Также необходимо упомянуть о Постановлении СНК «О снятии памятников, воздвигнутых в честь царей и их слуг, и выработке проектов памятников Российской Социалистической Республики» от 14 апреля 1918 г., в основу которого была положена «идея обращения изобразительного искусства к широким народным массам» [6]. В соответствии с этими принципами советская монументальная скульптура стала активно включаться в пространство крупнейших городов страны, дополняя их среду новыми акцентами. В дореволюционной Казани, по утверждению П. М. Дульского, скульптурное искусство было представлено мало<sup>2</sup>. Наиболее значимые произведения монументальной скульптуры, участвующие в формировании городской ткани, были созданы именно в советский период. На начальном этапе ведущую роль в становлении традиции социалистического искусства в столице советской Татарии

<sup>1</sup> Бринкман А. Э. Площадь и монумент как проблема художественной формы / пер. И. Хвойника. М.: Издательство Всесоюзной академии архитектуры, 1935, 296 с.

<sup>2</sup> Дульский П. М. Искусство в Татарской Республике за годы революции [Текст] / П. Дульский. - Казань : госуд. Объедин. типо-лит. Татполиграфа, 1929. - 16 с.

сыграли московские и ленинградские кадры. Как отмечает Д. Д. Хисамова, лишь с 1931 года в Казани начнут работать два местных скульптора, прошедших обучение в Ленинграде, – С. С. Ахун и К. С. Счастнев<sup>1</sup>.

1920-30-е гг. явились для советского искусства эпохой рубежности, фиксирующей постепенный переход от романтики авангарда к диадактическому пафосу классики, идеи служения государству. Е. Ю. Лекус связывает подобные трансформации с возникновением «новых противоречий, которые определили историческую, социальную и культурную специфику советской системы» [3]. В этих обстоятельствах художники всё чаще апеллируют к синтезу пластических искусств, которому на ближайшие десятилетия суждено будет стать магистральным методом манифестации политического курса в молодом советском государстве. В Казани наиболее наглядно подобные тенденции демонстрирует дошедшая до наших дней фонтанная скульптурная группа С. Ахуна «Владыкой мира будет труд», выполненная в 1930-е гг. С функциональной точки зрения, данная композиция призван организовывать вокруг себя пространство городского сада им. Кирова. В основе архитектоники скульптурной группы лежит принцип «трёх точек опоры», позволяющий автору обратиться к метафоре зиждущегося на самоотверженном труде мира. Рассматриваемую фонтанную композицию можно интерпретировать буквально: труд вращает планету, является двигателем прогресса. Кроме того, очевидно, что образ земного шара используется для индоктринации утопического нарратива о мировой революции. Именно такая картина мира – простая, но вместе с тем, чёткая и логичная – должна была сложиться у каждого советского человека.



а)



б)



в)

Рис.1.: а) Фонтан «Владыкой мира будет труд», 1936; б) Фонтан «Владыкой мира будет труд», наши дни; в) Кариатиды у главного входа Адмиралтейства

(Источник: а) URL: <https://pastvu.com/p/473369>; б) URL: [https://vk.com/wall-221789993\\_16](https://vk.com/wall-221789993_16); в) URL: <https://wikiway.com>)

Fig.1.: a) Fountain "The Lord of the world will be the labor", 1936; b) Fountain "The Lord of the world will be the labor", our days; c) Caryatids at the main entrance of the Admiralty  
(Source: a) URL: <https://pastvu.com/p/473369>; b) URL: [https://vk.com/wall-221789993\\_16](https://vk.com/wall-221789993_16); c) URL: <https://wikiway.com>)

Безусловно, скульптурную группу Ахуна, чьи студенческие годы прошли на невских берегах, можно воспринимать как цитату из эпохи высокого классицизма. Объект явно отсылает к фасадным композициям петербургского Адмиралтейства, которые по замыслу архитектора А. Захарова включали мотив с тремя карнатидами, несущими земную сферу. Если карнатиды в контексте общего архитектурного убранства Адмиралтейства «задействованы» в покорении водной стихии [14], то автор казанской скульптурной группы в свою очередь создаёт образ трёх атлантов, являющихся собой высказывание о необходимости приближения «светлого будущего». Обращаясь в подобной форме к идеологическому конструкту будущего, автор создаёт довольно ёмкий

<sup>1</sup> Хисамова Д. Д. Роль столичных скульпторов в развитии монументальной скульптуры Татарстана в советский период / Д. Д. Хисамова // Дом Бурганова. Пространство культуры. – 2011. – № 3. – С. 205-213.

незамысловатый и, притом, по-своему выразительный образ. Статуарная пластика характеризуется достаточно обобщённой моделировкой объёмов, и по всем внешним признакам данная композиция может восприниматься как образец модернистской скульптуры. «Мерный шаг, мускулистые полуобнаженные торсы мужских фигур, выразительная игра складок брюк создают эффект движения, ветра, направленного по спирали соответственно круговой траектории фигур»<sup>1</sup>. Работая над пластикой мужского тела, автор сосредотачивает внимание на гипертрофированной мускулатуре, мощных ладонях и широко распанных плечах, что позволяет ему создать не столько собирательный образ трудового народа, сколько аллегорию труда и созидательной деятельности.

По справедливому замечанию Д. Д. Хисамовой, городские монументы Казани, установленные в советский период, зачастую стилистически диссонировали со своими постаментами<sup>2</sup>. Не вполне гармоничное сочетание демонстрирует и рассмотренная выше работа С. Ахуна, имеющая постамент в ярко выраженных классических формах с поясами из мелкомасштабного аканта. С другой стороны, растительный мотив в данном случае может быть истолкован как аллюзия на символику процветания, что в целом рифмуется с семантическим строем ахуновской композиции. К несомненным художественным достоинствам этой работы можно отнести её согласованность с пространственным масштабом сада им. Кирова. В сложившейся градостроительной ситуации она воспринимается в качестве ожидаемой композиционной доминанты локального значения, поддерживающей ненавязчивую визуальную связь с окружающей застройкой средней этажности. Вместе с тем, следует отметить, что, будучи композиционно замкнутой на самой себе, данная скульптурная группа, вероятно, не нуждается в обязательном визуальном контакте с другими объектами. Основными энергетическими характеристиками скульптурной композиции «Владыкой мира будет труд» являются равновесие и закольцованный динамика. Общая сдержанность композиции позволяет ей весьма органично встроиться в структуру рекреационного пространства.

Другой, не менее знаменитой работой С. Ахуна становится созданная им в 1936 году фонтанная статуя для сада Рыбака, ныне утраченная. В ней также проявилось стремление социалистического реализма 1930-х гг. к монументальному обобщению, по-прежнему сильны модернистские пластические принципы. Ахун обращается к мифологеме вечной молодости через образ атлетически сложенного юноши, детально проработанная грудная клетка позволяет автору перейти к буквальной реализации выражения «дышать полной грудью». В бинарной оппозиции аполлонического и дионаисийского Ахун, мысля в русле общей идеологической повестки своего времени, явно склоняется в пользу рационального начала. Лицо рыбака выражает удивительное спокойствие, сосредоточенность, человеческое достоинство, сопровождающие его глубокий вдох перед усилием. Скульптор затрагивает тему превосходства человеческого разума над природой, торжества культуры, что всецело читается в героической позе покорителя, принципиально наделяемого автором народными чертами.

Следует отметить, что в постановке ног рыбака существует нечто общее с тем, как трактуется принцип хиазма в выдающейся бронзовой статуе Давида работы Донателло. Это позволяет говорить о том, что Ахун мог отождествлять своего рыбака также со знаменитым ветхозаветным образом. В пространственной композиции городского сада статуя Ахуна формирует довольно динамичный силуэт за счёт выраженной вертикали человеческой фигуры. Ввиду этого скульптура воспринимается как визуальный ориентир и фокус притяжения на местном уровне.

<sup>1</sup> Хисамова Д. Д. Особенности развития монументальной скульптуры в 1930-1940-е годы в Татарстане / Д. Д. Хисамова // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 2. – С. 382-386.

<sup>2</sup> Хисамова Д. Д. Роль столичных скульпторов в развитии монументальной скульптуры Татарстана в советский период / Д. Д. Хисамова // Дом Бурганова. Пространство культуры. – 2011. – № 3. – С. 205-213.



а)

б)

в)

Рис.2.: а) Статуя в саду Рыбака, 1950-е; б) Статуя Рыбака, 1960-е; в) Давид, Донателло  
(Источник: а) URL: <https://pastvu.com/p/430016>; б) URL: <https://pastvu.com/p/544938>; в) URL:  
<https://bangkokbook.ru/galereya/donatello-statuya-davida-80-foto.html>)

Fig.2.: a) The statue in the park of the Fisherman, 1950s; b) The Statue of the Fisherman, 1960s; c)  
David, Donatello  
(Source: a) URL: <https://pastvu.com/p/430016>; b) URL: <https://pastvu.com/p/544938>; c) URL:  
<https://bangkokbook.ru/galereya/donatello-statuya-davida-80-foto.html>)

Окончательный разрыв с модернистскими изобразительными принципами произошёл в послевоенные годы, когда такие художественные практики как импрессионизм, кубофутуризм, ар-деко были признаны упадническими. В этот период монументальная скульптура социалистического реализма решительно уходит от условности образов, отдавая предпочтение достоверному методу изображения. Портреты реальных исторических личностей в городской среде начинают преобладать над обобщёнными жанровыми изваяниями. Однако нередко за правдивую трактовку выдавалась идеализированная модификация образа, что свидетельствует о возврате к использованию обобщённого типа. Прежде всего, это непосредственно относится к скульптурным портретам вождей и революционеров. Важный вывод о десакрализации подобных монументов в ситуации постидеологии делает К. П. Карагода: «Памятники вождей революции <...> перестали нести в себе актуальность, превратившись в исторические артефакты» [10].

В Казани послевоенных лет наиболее выдающиеся произведения монументальной скульптуры сосредотачиваются в районе улиц Пушкина и Куйбышева, формируя сеть локальных акцентов и композиционных доминант. Этую скульптурную галерею составляют памятники В.И. Ленину, А.С. Пушкину, А.М. Бутлерову, революционеру М. Вахитову, а также два монумента, посвящённых поэту Г. Тукаю. Следует отметить, что рассматриваемая территория характеризуется довольно сложной геоморфологической структурой и имеет естественный уклон рельефа в южном направлении. Планировочная ось улицы сформировалась на месте оврага в соответствии с его конфигурацией. У Р.И. Султанова читаем: «Этот овраг, имея крутой обрывистый северный берег <...>, выходил на низменную часть, где Булак соединился с озером Нижний Кабан (район Тукаевской площади). Левыми отвершками его являлись современные улицы Некрасова, Щапова, Галактионова<sup>1</sup>. С точки зрения сложившейся застройки, данной территории была свойственна стилистическая полифония – от дореволюционной эклектики во всех её проявлениях до конструктивизма (Пушкина, 24), ар-деко и сталинского неоклассицизма. Каждое здание характеризовалось собственным ритмом членений и системой акцентов.

<sup>1</sup> Султанов Р. И. Историческая география Казани (город и его предместья в XVI-XVII веках) / Р. И. Султанов. – Казань: Магариф, 2004. – 271 с.

Однако будучи лишёнными фасадной скульптуры (исключение составляет лишь театр оперы и балеты), фасады, формировавшие уличный фронт, обладали практически одинаковым потенциалом для взаимодействия с отдельно стоящим скульптурным компонентом.

В подобных ландшафтно-градостроительных условиях было принципиально важно, чтобы вновь возводимые советские монументы заняли семантически выверенное местоположение – каждый сообразно своему статусу.

На верхней террасе по ул. Пушкина расположилась симметрично организованная площадь Свободы, наиболее значимые объекты которой пронизывают её продольную ось. Сооружения, находящиеся в структуре этой площади, по выражению С.М. Червонной, составляют «узловой городской ансамбль»<sup>1</sup>. Архитектурный эйдос данного пространства можно определить как визуальную коллизию двух стихий, одновременно претендующих на главенство над этой площадью, – искусства, воплощённого в монументальном синтезе архитектуры и скульптуры театра оперы и балета, и политики, олицетворяемой лаконичным и крайне рациональным зданием Кабинета министров. Показательно, что историческое название площади, которое она носила до революции, – Театральная. С приходом советской власти мятник качнулся в другую сторону, и в 1950-е гг. данное пространство должно было пополниться сразу двумя сооружениями с ярко выраженной пирамidalной тектоникой – памятником В.И. Ленину со ступенчатым пьедесталом и зданием обкома ТАССР. Последнее изначально задумывалось как сталинская высотка местного уровня с характерным пирамидальным силуэтом. Однако позже экономическая основа этого проекта была пересмотрена в связи Постановлением «Об устранении излишеств в проектировании и строительстве», в результате чего здание приобрело статичную композицию.

Памятник Ленину, выполненный по проекту скульптора П.П. Яцыно и архитектора А.И. Гегелло, был установлен на том месте, где некогда находилось прежнее здание театра. В сложившейся градостроительной ситуации монумент явился необходимой композиционной доминантой, несколько смягчившей, нейтрализовавшей пространственную цезуру между фасадами и ставшей своеобразным компромиссом, зрительно объединяющим все элементы среды. Монумент обращён к зданию театра с целью подчеркнуть, что основной ракурс восприятия памятника должен включать в качестве фона правительственный дворец. Следовательно, именно эти два объекта – монумент и здание обкома – образуют ансамбль, раскрывающийся на улицу Карла Маркса.

Ступенчатый постамент памятника по своей архитектуре отдаленно напоминает щусевский мавзолей, для которого также принципиально важна пирамidalная композиция как древнейший символ верховенства власти, торжества высшей справедливости и истины в последней инстанции. Сходство прослеживается также в функциональном отношении, поскольку оба сооружения являются трибуналами, активно использовавшимися во время всевозможных демонстраций. В центральной части трибуны-памятника размещен барельеф, посвящённый студенческой сходке 1887 года и воспринимаемый не иначе как житийный сюжет, связывающий юность вождя с Казанью. Следует отметить, что постаменты памятникам Ленину зачастую приобретали сложную конфигурацию, имевшую чаще всего вид симметричного архитектоника, композиция которого развивается центробежно – от одиночных крупных монолитов к врезкам из более мелких призматических объёмов. Этим подчёркивалось многогранность и сложность ленинского учения [13].

По своим пластическим качествам скульптура Ленина является ярчайшим примером соцреалистического монументального искусства и обнаруживает стремление к портретному сходству. Работая над монументом, автор прибегает к соответствующей атрибутике, составлявшей канонический образ вождя в советской скульптуре и живописи. В частности, запоминающейся деталью является положение руки,

<sup>1</sup> Червонная С. М. Искусство советской Татарии : Живопись. Скульптура. Графика / С. М. Червонная ; макет и оформление художника С. М. Клейнэрд. Москва: Изобразительное искусство, 1978. – 295 с.

придерживающей ворот распахнутого пальто. В другой руке Ленин сжимает свёрнутый свиток, традиционно понимавшийся в античной скульптуре как атрибут оратора. Определённое пластическое изящество читается в незначительном повороте головы вождя, благодаря чему его лицо может восприниматься по-разному в зависимости от ракурса и освещения. Иными словами, общая портретная характеристика в данном случае должна считываться не одномоментно при фронтальном восприятии, но в процессе прохождения по т. н. «дуге обхода», что позволяет образу обогащаться различными психологическими нюансами. В отсутствие в пластике монумента выраженного диагонального вектора, фигура Ленина кажется предельно статичной. Вождь изображён не в движении, но, скорее, в момент выступления перед народом. Воспроизведенная скульптором поза выражает торжественное спокойствие,озвученное церемониальному пафосу площади. Кроме того, памятник Ленину вынужден визуально коммуницировать со статуей Терпсихоры, увенчивающей фронтон театра и притязающей на статус духовного покровителя места. Этот диалог становится кульминацией и одновременно логическим итогом пространственного развития площади Свободы.

Завершённое к середине 1950-х гг. здание театра оперы и балета по проекту И. Гайнутдинова воспроизводит композицию античного псевдопериптера, что заставляет воспринимать данное сооружение в центре Казани не иначе как грандиозный храм искусства. Здание фланкируется двумя монументами, фиксирующими композиционные центры его боковых фасадов, однако типологически не являющимися интегрированной фасадной скульптурой. С восточной стороны от театра установлен памятник А.С. Пушкину (обращённый на ул. Пушкина), с западной – выдающемуся татарскому поэту Г. Тукаю (выходит на ул. Театральную). Оба монумента появились в 1956 году и были вписаны в фасадные ниши, образующие вырез дугообразного профиля во всю высоту здания. Однако такое лучковое углубление, на наш взгляд, было бы композиционно оправдано даже в том случае, если бы каждый из памятников отстоял от фасада театра на несколько метров, поскольку скульптурные доминанты, помещённые в узкие коридоры улиц Пушкина и Театральной, на чисто зрительном уровне создают ощущение перегруженности. Как следствие, одна из стен этого коридора вынуждена приобрести изгиб, подобно натянутой тетиве лука, и тем самым снять напряжение. Похожий приём, однако в гораздо более масштабном варианте был использован Карлом Росси при проектировании здания Главного штаба в Санкт-Петербурге и соответственно пространства Дворцовой площади, центр которой несколькими годами позже займёт Александровская колонна Монферрана. Как отмечает А. Степанов, именно такое решение позволило избежать визуальной имплозии между противолежащими фасадными строчками, сдержать ритмический «натиск» от южной стены Зимнего дворца<sup>1</sup>.

Феноменологический подход к пониманию смысловой роли двух рассматриваемых монументов позволяет воспринимать их не только через идею диалога культур, но также в ключе романтического концепта, описывающего две ипостаси поэтического творчества. Основным инструментом презентации этого концепта становится язык скульптурной пластики. Если скульптор Н. К. Вентцель, работая над памятником А.С. Пушкину, создаёт образ поэта-жреца, поэта-судии, в чьей закрытой позе и пронзительном взгляде читается независимость, самодостаточность, ощущение собственной исключительности, то Г. Тукай в исполнении Л. И. Шулик приобретает черты поэта-пророка – кроткого, несколько надмирного, в противоположность А.С. Пушкину открытого миру и ищущего в нём опоры. Можно предположить, что в подобном пространственном взаимодействии здания театра и двух монументов величайшим поэтам утверждается идея первичности литературы по отношению к синтетическим видам искусства. Неудивительно, что эти два монумента являются особо почитаемыми горожанами. Ввиду необходимости проводить ежегодные церемонии возложения цветов в пространстве перед памятниками за счёт тротуаров сформировалось подобие небольших проходных площадей, благодаря которым выдерживается дистанция со зрителем.

<sup>1</sup> Степанов А. В. Феноменология архитектуры Петербурга / Александр Степанов. - Санкт-Петербург : Арка, 2016. - 395 с. : ил.

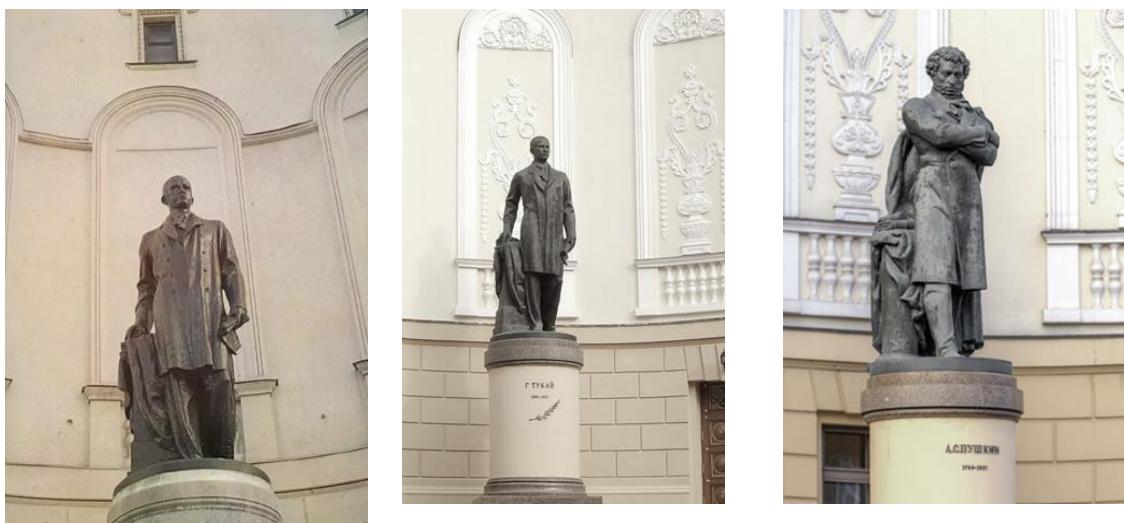


Рис.3.: а) Памятник Г. Тукаю в нише театра оперы и балета, 1970-е; б) Памятник Г. Тукаю, наши дни; в) Памятник А.С. Пушкину, наши дни

(Источник: а) URL: <https://pastvu.com/p/1882144>; б) URL: <https://rus.sptatar.com>; в) URL: <https://triptonkosti.ru/6-foto/pushkin-v-kazani-proekt-91-foto.html>)

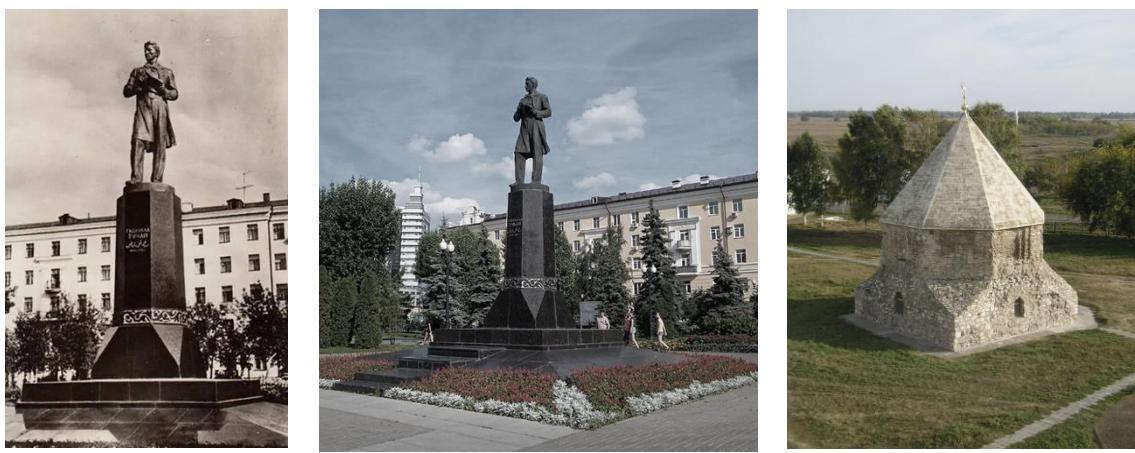
Fig.3.: a) Monument to G. Tukai in the niche of the Opera and Ballet Theater, 1970s; b) Monument to G. Tukai, our days; c) Monument to A.S. Pushkin, our days

(Source: a) URL: <https://pastvu.com/p/1882144>; b) URL: <https://rus.sptatar.com>; c) URL: <https://triptonkosti.ru/6-foto/pushkin-v-kazani-proekt-91-foto.html>)

Стоит отметить, что личность и творческое наследие Г. Тукая вызывали самый живой интерес у отечественных художников – представителей как монументального, так и станкового крыла. Другой, не менее занимательной трактовкой образа великого татарского поэта является монумент, созданный в 1958 году С. Ахуном в соавторстве с московскими ваятелями Л. Е. Писаревским и Л. М. Кербелем и архитектором Л. Н. Павловым. Работая в данном случае в портретном жанре, Ахун заявляет о себе как о признанном мастере зрелого социалистического реализма. В отличие от статуарности позы, запечатлённой Л. Шуликом, автор этого монумента фиксирует, в сущности, случайно выхваченный момент, по всей видимости подразумевая момент вдохновения, внезапно посетившего поэта. Можно предположить, что мотив «чудного мгновенья» соотносится автором с дуновением ветра, читающимся в игре складок и захлёстывании левой полы пальто. Голова поэта повёрнута в три четверти, как бы навстречу ветру. По наблюдениям Т.Н. Кривошеевой, композицию постамента данного памятника составляет четверик со скошенными верхними углами, благодаря чему возникает ассоциация с Чёрной палатой Болгары<sup>1</sup> [8]. Кроме того, исследователь обращает внимание на «камнерезный мотив, соответствующий орнаментальному декору в Болгаре». Таким образом, оформление монумента сопровождается региональным мотивом.

С градостроительной точки зрения памятник Г. Тукаю, установленный на вытянутый гранёный постамент, является доминирующим элементом Тукаевского сквера. Обладая выразительным вертикальным силуэтом, монумент контрастирует с преобладающими горизонтальными членениями пятиэтажных сталинских домов, выделяется на фоне протяжённых малодинамичных фасадов. По ходу движения от Тукаевской площади в сторону озера Кабан можно заметить, что памятником татарскому поэту в сценографии города предваряется появление театра им. Г. Камала и панорамы Старо-Татарской слободы.

<sup>1</sup> Вероятнее всего, автор имеет в виду Восточный мавзолей в Болгаре, обладающий описанной объёмной композицией



а)

б)

в)

Рис.4.: а) Памятник Г. Тукаю в сквере Тукая, 1970-е; б) Памятник Г. Тукаю в сквере Тукая, наши дни; в) Восточный мавзолей в Болгаре

(Источник: а) URL: <https://pastvu.com/p/977348>; б) URL: <https://fotoload.ru/foto/619919/1920x1080/>;  
в) URL: <https://smorodina.com/objects/vostochnyy-mavzoley?runtips=true>)

Fig.4.: а) Monument to G. Tukai in Tukai Square, 1970s; б) Monument to G. Tukai in Tukai Square, nowadays; в) The Oriental Mausoleum in Bolgar

(Source: а) URL: <https://pastvu.com/p/977348>; б) URL: <https://fotoload.ru/foto/619919/1920x1080/>; в) URL: <https://smorodina.com/objects/vostochnyy-mavzoley?runtips=true>)

Следует отметить, что начиная с 1960-х гг. большое внимание уделяется условиям активного визуального взаимодействия монументальных композиций с городским ландшафтом, особую ценность начинают представлять эффектные ракурсы восприятия [7]. Так, в 1985 году на холме между улицами Бутлерова и Некрасова по проекту архитектора М. Х. Агишева и московского скульптора Ю. Г. Орехова был установлен памятник татарскому революционеру М. Вахитову. Этот монумент был призван выступать композиционным ядром площади, в народном обиходе именовавшейся площадью «Трёх холмов». Архитектурным фоном для восприятия памятника стало возведённое в конце 1930-х гг. здание финансово-экономического института, расположенное на соседнем холме между улицей Бутлерова и Щербаковским переулком. Монумент, в свою очередь, логически предваряет это величественное сооружение, выполненное в постконструктивистских формах.

Скульптор Ю. Г. Орехов стремится создать образ героя-покорителя через активную вертикальную композицию монумента. Левая рука Вахитова слегка отведена в сторону и назад, из чего угадывается намерение революционера описать объединяющим движением всё обозреваемое пространство. Именно этот жест позволяет автору создать поистине народный образ, надо полагать, отсылающий к героическому народному эпосу. Орехов изображает татарского революционера неспешно ступающим по родной земле. В монументе находят воплощение важнейшие принципы социалистического реализма – исторический оптимизм и «героика революционной борьбы и её деятелей, ведущих за собой народные массы»<sup>1</sup>. Несмотря на присущие монументу художественные достоинства, ряд исследователей отмечают маловыразительность созданного образа<sup>2;3</sup>,

<sup>1</sup> Популярная художественная энциклопедия: Архитектура. Живопись. Скульптура. Графика. Декоративное искусство/Гл. ред. В. М. Полевой; Ред. Кол.: В. Ф. Маркузон, Д. В. Сарабьянов, В. Д. Синюков (зам. гл. ред.), – М.: «Сов. Энциклопедия». Книга II. М–Я, 1986. – 432 с., 32 л. Ил.

<sup>2</sup> Абдрашитов А. Размышления об установленных скульптурных памятниках в Казани с 1898 по 2005 годы. – Казань, 2005.

<sup>3</sup> Хисамова Д. Д. Роль столичных скульпторов в развитии монументальной скульптуры Татарстана в советский период / Д. Д. Хисамова // Дом Бурганова. Пространство культуры. – 2011. – № 3. – С. 205-213.

что, по всей видимости, следует связывать со схематизмом в портретной характеристистике революционера.

Орехов весьма убедительно обосновывает расположение монумента на возвышенности через пластику расстёгнутой шинели, как бы развеваемой ветром. Скульптура установлена на дублирующий её высоту лаконичный постамент вытянутой призматической формы. При восприятии памятника «со спины», с вершины Вахитовского холма, возникает перспективная перекличка монумента с колокольней Богоявленского собора – визуальный контакт двух градостроительных доминант соответственно локального и городского значения. Однако приходится констатировать, что после слияния площади Трёх холмов и Тукаевской площади, вследствие произведённой в середине 2000-х гг. реконструкции, памятник Вахитову в структуре вновь образовавшегося пространства утратил статус главного средового знака, включившись в полицентрическую систему многочисленных означающих.

Другой значимой работой скульптора Ю.Г. Орехова, созданной для городского пространства Казани, стал памятник выдающемуся химику, ректору Казанского императорского университета А. М. Бутлерову. Данный монумент, установленный в 1978 году при входе в Ленинский садик со стороны ул. Пушкина, демонстрирует ещё одну тенденцию в развитии советской монументальной пластики. Наряду с жанровой скульптурой, грандиозными памятниками вождям, революционерам, героям войны, а также мемориальными монументами в социалистическом реализме существовала ниша, занимаемая образами деятелей науки и искусства. Скульптура, призванная увековечивать память представителей интеллигенции, маркировалась в городской среде более камерным масштабом, создавая локальные градостроительные и смысловые акценты. Рассматривая подобные композиционные внедрения в качестве инструментов гуманизации среды, И. Иванова даёт следующий комментарий этому проявлению: «наряду с крупными, градостроительно значительными монументами четче выявилось и другое направление в композиции памятников — более камерных, своими небольшими размерами и эмоциональным настроем как бы непосредственно приближенных к человеку. Радиус воздействия этих памятников в городском ансамбле сравнительно невелик, зона восприятия, как правило, ограничена участком сквера, улицы, бульвара»<sup>1</sup>. В этом смысле памятник А.М. Бутлерову весьма органично воспринимается на фоне природного компонента – своеобразной зелёной завесы Ленинского садика. С точки зрения градостроительной ситуации, монумент ориентирован на стрелку улиц Пушкина и Профессора Нужина, предваряя собой главный вход на территорию рекреационного пространства. Памятник Бутлерову призван как бы перенаправлять внимание пешехода, совершающего подъём по ул. Пушкина, в сторону Ленинского садика, обозначая тем самым наличие альтернативного маршрута.

В пластическом отношении скульптурный портрет А.М. Бутлерова следует иконографическим принципам изображения учёных, представителей интеллигенции: выдающийся химик расположился в изящном кресле в закрытой позе «нога на ногу». Это сообщает создаваемому образу некоторую отрешённость, для автора становится принципиально важно запечатлеть состояние погружённости учёного в собственные размышления. Кроме того, Ю.Г. Орехов сосредотачивает внимание на утончённости манер истинного интеллигента. Портретная характеристика Бутлерова наделяется меланхолическими чертами, поскольку меланхолия в общепринятом понимании является душевной болезнью учёных и гениев. По замечанию Д. Д. Хисамовой, именно такие монументы демонстрируют «的独特性 Казани как города с великим культурным багажом».

<sup>1</sup> Иванова И. Скульптура в городской среде // Архитектурное творчество СССР. Проблемы, суждения, информации : Выпуск 3 / Ответственный редактор д-р арх., проф. Ю. С. Яралов ; Государственный комитет по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР, Центральный научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры. — Москва : Стройиздат, 1976. — 192 с., ил. — С. 57—62.

Надо сказать, что творческий поиск советских скульпторов начиная с 1960-х гг. тесно связан с приобщением к мировым художественным принципам и тенденциям, когда специалисты начинают в достаточно смелой форме обращаться к более прогрессивным методам и приёмам. Как отмечает Д. Д. Хисамова, к этому периоду в Татарстане «сформировалась группа профессиональных скульпторов, способных к созданию значимой монументальной скульптуры». Однако по-прежнему велика была роль столичных мастеров, с участием которых в середине 1960-е гг. в Казани закладывается один из двух крупнейших мемориальных объектов – памятник М. Джалилю. Другим подобным объектом стала мемориальная композиция «Павшим в борьбе за Советскую власть». Оба комплекса отражают одну и ту же тенденцию: в структуре городской среды они не являются композиционно обособленными, но играют роль входных групп для крупных архитектурно-ландшафтных единиц – Казанского кремля и ЦПКиО им. М. Горького соответственно. Такое расположение позволяет выполнять им функцию островков памяти, обладающих непревзойдённой драматической силой воздействия.

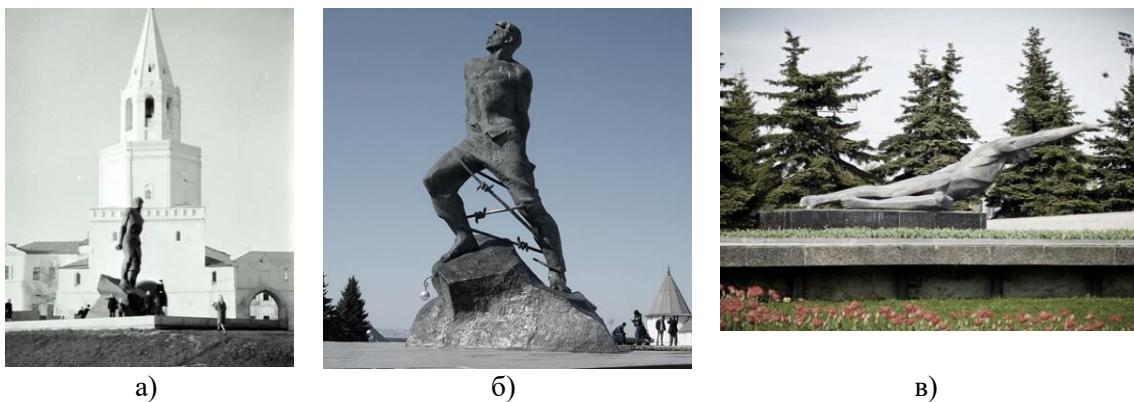


Рис.5.: а) Памятник М. Джалилю, 1966; б) Памятник М. Джалилю, наши дни; в) Скульптурная композиция «Завет» (Источник: а) URL: <https://pastvu.com/p/1162336>; б) URL: <http://rasfokus.ru/photos/active/photo4012246.html>; в) URL: <https://bangkokbook.ru/zametki/pamyatnik-v-parke-gorkogo-97-foto.html>)

Fig.5.: a) Monument to M. Jalil, 1966; b) Monument to M. Jalil, nowadays; c) Sculptural composition "Testament" (Source: a) URL: <https://pastvu.com/p/1162336>; b) URL: <http://rasfokus.ru/photos/active/photo4012246.html>; c) URL: <https://bangkokbook.ru/zametki/pamyatnik-v-parke-gorkogo-97-foto.html>)

Памятник татарскому поэту, Герою Советского Союза Мусе Джалилю, созданный по проекту московского скульптора В. Е. Цигаля и архитектора Л. Г. Голубовского, был установлен на площади Первого Мая в 1966 году. Ориентируясь на критерий узнаваемости, В.Е. Цигаль в то же время создаёт собирательный эпический образ народного героя, аллегорию несломленного духа. Устремлённая вперёд фигура поэта олицетворяет бесстрашие перед лицом смерти, готовность подставить себя под удар и пожертвовать собственной жизнью. Монумент отличается обобщениями в моделировке объёмов, укрупнённой пластикой, позволяющей прочитывать движение. Напряжение, сообщаемое за счёт намеченной мускулатуры обнажённого торса, выявления выпирающей диафрагмы согласуется с постановкой ног, превозмогающим усилием которых поэт разрывает путы колючей проволоки. Суровый, несокрушимый образ отождествляется со скалой, образующей твердь под ногами поэта, который одержал духовную победу над своими палачами. Гордо поднятая голова, наклонённый плечевой пояс, согнутая в колене правая нога в совокупности создают графически выразительный каскадный силуэт. Особую экспрессию образу сообщает фактурный металл, в котором отлит монумент. По мнению Т. Н. Кривошеевой, выполненная В. Е. Цигалём в 1994 году мемориальная стена, над которой возвышается памятник, воспроизвела «мотив мусульманских надгробий с цитатами из стихов поэта» [8]. На этой стене, внешне

непретенциозной и композиционно нейтральной, размещены барельефные портреты тех, кто разделил участь Джалиля в день его казни в тюрьме Плётцензее.

Монумент обращён в противоположную от крепостных стен сторону, что позволяет визуально подчеркнуть мотив стремления к свободе. Памятник также повёрнут спиной к площади Тысячелетия и бывшей территории посада. Соответственно, основная точка восприятия мемориального комплекса находится на площади перед Спасской башней со стороны ул. Кремлёвской. Дабы иметь возможность воспринимать монумент с основного рабочего ракурса, необходимо совершить символическое восхождение на кремлёвский холм. Следует отметить, что и по замыслу, и по ориентации в пространстве, и по пластическим и композиционным характеристикам динамичный и экспрессивный монумент Цигаля являл собой полную противоположность памятнику Александру II. Будучи прежней доминантой площади, этот памятник изображал застывшую, абсолютно статичную позу и представлял собой парадный портрет российского государя, взирающего на южный фасад Кремля. Активный рельеф, отличающий данную территорию, может послужить основанием для оправдания инициативы, связанной с динаминацией характера площади. С. М. Червонная отмечала удачное расположение монумента – «по возможностям широкого обзора со стороны площади, над крутым спуском к реке, на фоне волжских далей»<sup>1</sup>. Именно такое решение привело к созданию цельного и выразительного произведения монументальной скульптуры, ставшего одним из брендов и символов Казани.

Не менее смелым и новаторским высказыванием является воздвигнутый в 1967 году на площади парка Горького мемориальный комплекс «Павшим в борьбе за Советскую власть» с монументом «Завет». Следует отметить, что авторами этого объекта стали уже местные специалисты – скульптор В. М. Маликов и архитекторы А. А. Спориус и Г. Н. Пичуев. Динамичная тридцати-девятиметровая стела, являющаяся вертикальной доминантой площади, олицетворяет непреложные советские идеалы. Ей визуально противопоставляется скульптурная композиция «Завет», образующая вкупе с мемориальной стеной на заднем плане горизонтальную доминанту. Данный монумент изображает изогнувшуюся от боли и напряжения фигуру борца, погибающего за идею справедливого мироустройства. Левой рукой смертельно раненый герой из последних сил стремится придать устойчивость положению своего тела, вытянутая вперёд правая рука с разведёнными пальцами указывает на стелу и вечный огонь – именно в этом пластическом жесте содержится адресованное потомкам завещание, призывающее продолжать величайшее из начинаний человечества. Ощущение рывка, последнего усилия сообщается выразительным движением фигуры, описывающим спираль. В монументальной драматургии комплекса это движение пресекается невозмутимой вертикалью стелы – зрительно более мощным вектором, – благодаря чему вся система переходит в состояние покоя. В результате пространство мемориала приобретает особое, метафизическое измерение, в котором временное уравновешивается вечным, смерть встраивается в нарратив бессмертия. Как пишет С. М. Червонная, «труднейший для скульптуры мотив падения решён с таким тактом, что нисколько не нарушено величие героического образа».

В пластическом отношении «Завет» в целом следует авангардной изобразительной манере. Фигура павшего моделируется крупными обобщёнными плоскостями, формирующими винтовую пластику, вследствие чего возникают большие тональные отношения и резкие светотеневые контрасты. Подобное обобщение даёт возможность автору изобразить целиком обнажённую фигуру, не отсылающую к какому бы то ни было конкретному историческому, социальному или региональному контексту. Весь комплекс приподнят на невысокий стилобат, предполагающий символическое восхождение. Композиция воспринимается на фоне рощи парка Горького, играющей роль зелёной доминанты местности.

<sup>1</sup> Червонная С. М. Искусство советской Татарии : Живопись. Скульптура. Графика / С. М. Червонная ; макет и оформление художника С. М. Клейнард. Москва: Изобразительное искусство, 1978. – 295 с.

В отдельном порядке в рамках темы советского монументальной пластики Казани следует упомянуть об образцах сталинского архитектурно-скульптурного синтеза, появившихся вне исторического центра в послевоенную эпоху. В 1950-е гг. такие сооружения, выполнившие функцию входных групп и отсылавших к триумфальной архитектуре античности, были устроены на площади перед территорией Казанской ярмарки и при входе в парк «Крылья Советов». Несмотря на нетиповые решения, оба сооружения обладают набором общих свойств, таких как трёхчастная композиция, соотнесение одиночных вертикальных статуй с меж-арочными устоями и формирующаяся при этом общая тектоника объекта. В парке «Крылья Советов» скульптурные композиции установлены на невысокие постаменты и находятся практически на уровне пешехода, что сближает их по духу с жанровой садово-парковой скульптурой. Между тем, у входной группы Казанской ярмарки статуи помещены на высокие контрфорсы, достигающие пятых арок, в результате чего скульптурные композиции приобретают более монументальное звучание, характеризующее фасадную скульптуру. Стоит отметить, что подобный скульптурный компонент получил широкое распространение в советских городах посредством метода тиражирования, являясь не копией, выполненной художником в технике лепки или камнесечения, но слепком – репродукцией, изготавливавшейся формовщиком [6].

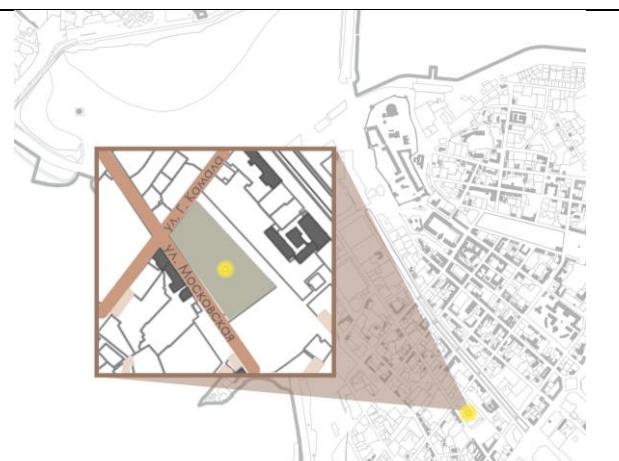
Такая скульптура призвана выступать своеобразной аллегорией *genius loci*. Арка Казанской ярмарки, таким образом, включает аллегории трёх различных ремёсел, а также статую музы. Пропилеи у парка «Крылья Советов», в свою очередь, дополняются образами, символизирующими четыре различных рода деятельности, на которых зиждется советский строй: рабочие, колхозники, интеллигенты, представители опасных профессий.

Столь претенциозное архитектурно-скульптурное предварение общественного пространства создаёт ощущение лишь мнимого, иллюзорного уюта, как бы подчёркивая, что «то, что принадлежит всем, – не принадлежит никому»<sup>1</sup>. С другой стороны, эти скульптурные композиции в известной мере являются напоминанием о том, что всевозможные парки и скверы, места отдыха зачастую создавались усилиями самих горожан, что само по себе вызывает ассоциации с образом масштабной народной стройки.

Сituационные планы с размещением рассмотренных скульптурных объектов приведены в табл. 1.

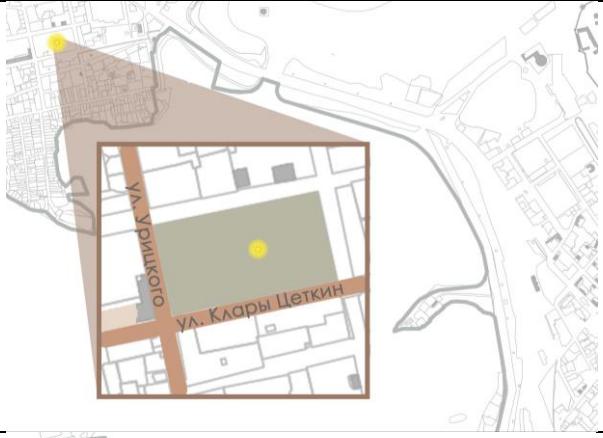
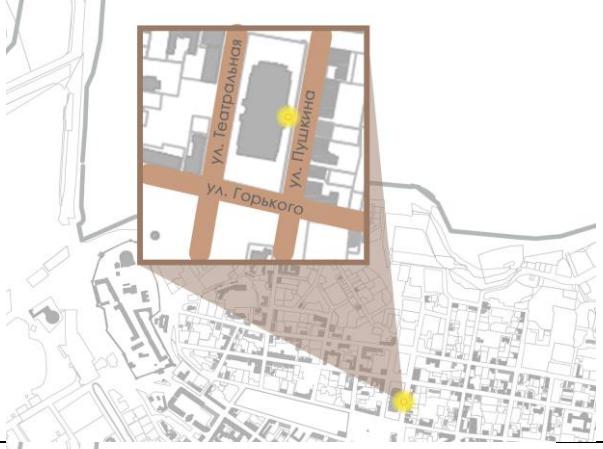
Таблица 1

## Размещение скульптурных объектов на схемах установочных площадок

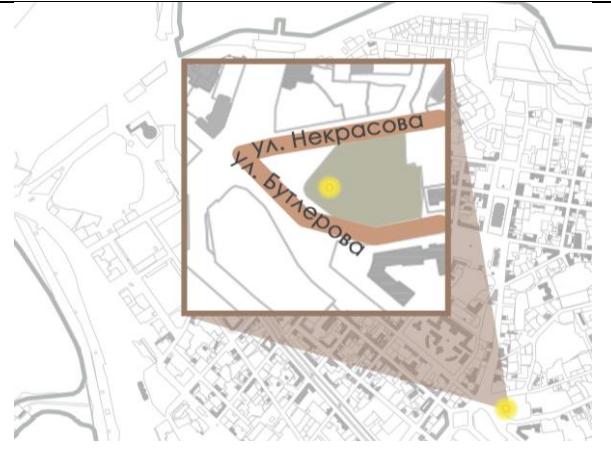
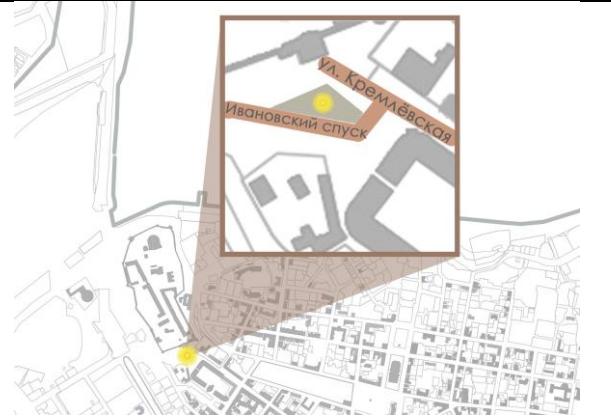
№ п/п	Название объекта	Сituационный план
1	Фонтанная скульптурная группа «Владыкой мира будет труд», сад им. Кирова 	

<sup>1</sup> Постникова Т.В. Повседневность и смысл: опыт философско-антропологической археологии //Аспекты Сб статей по философским проблемам истории и современности ВыпШ — М Современные тетради, 2005 — 312 с — С 124-134.

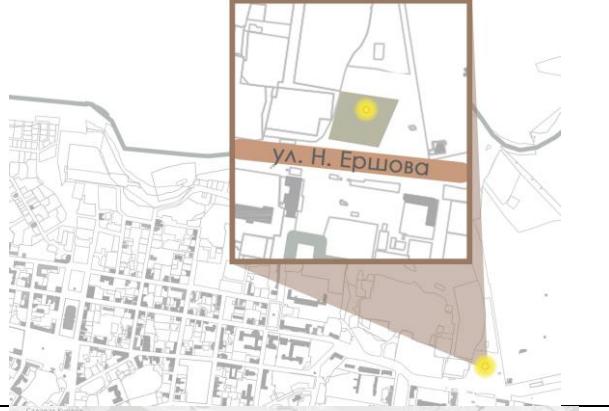
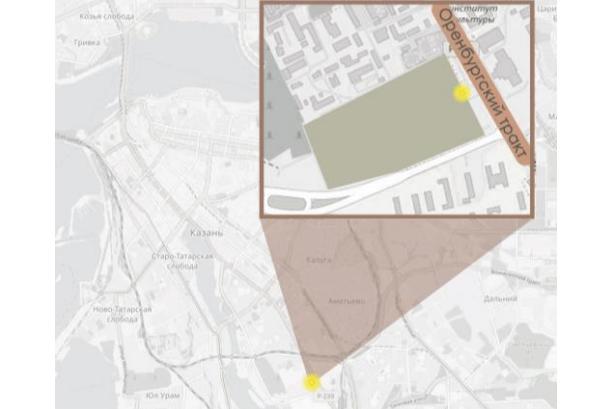
## Продолжение таблицы 1

2	Фонтанная статуя в саду Рыбака (утрачена)		
3	Памятник В. И. Ленину на площади Свободы		
4	Памятник А. С. Пушкину в нише театра оперы и балета		
5	Памятник Г. Тукаю в нише театра оперы и балета		

## Продолжение таблицы 1

6	Памятник Г. Тукаю в Тукаевском сквере		
7	Памятник М. Вахитову перед сквером Вахитова		
8	Памятник А. М. Бутлерову при входе в Ленинский садик		
9	Памятник М. Джалилю на площади 1 Мая		

## Окончание таблицы 1

10	мемориальный комплекс «Павшим в борьбе за Советскую власть» с монументом «Завет»		
11	Входная группа парка «Крылья советов»		
12	Входная группа выставочного центра «Казанская ярмарка»		

Безусловно, произведения монументального советского искусства в городском пространстве Казани составляют довольно любопытный художественный и градостроительный феномен, достойный масштабного научного исследования. Существует немало свидетельств, позволяющих констатировать, что казанские монументы отражают ключевые тенденции и стратегии, сопровождавшие эволюцию метода социалистического реализма. Вопреки своему статусу провинциального города Казань стала местом, где этот художественный процесс был представлен во всём его многообразии. Советская скульптура, интегрированная в структуру исторической дореволюционной застройки, в отдельных случаях выступала своеобразным критерием модерности, в соотношении с которым эти городские ансамбли следовало воспринимать. Вне всякого сомнения, в Казани знаковые монументы советского периода оказали большое влияние на формирование культурной памяти города. Многие из этих изваяний создают прецедент усвоенности скульптурного компонента пространством, подтверждая высказывание И. Е. Хвойника о том, что «тоска [скульптуры] по монументальности была

в сущности тоской по архитектурной среде»<sup>1</sup>. Именно такое композиционное и семантическое взаимодействие архитектуры и скульптуры в рационально сбалансированном соотношении тела и пустоты позволяет считывать город как текст, причём как на формальном, так и на онтологическом уровне.

#### 4. Заключение

1. С точки зрения статуарной пластики, в советских монументах Казани прослеживается динамика от натуралистичности и детальности моделировки до восприимчивости в высокой степени к монументальным обобщениям.

2. Жанрово-тематический состав казанской монументальной пластики представлен мемориальной, жанровой садово-парковой и портретной скульптурой. Последний тип характеризуется дихотомическим делением на грандиозные, наполненные идеологическим содержанием монументы, изображавшие в полный рост вождей, деятелей революции, героев войны, и памятники камерного масштаба, посвящённые учёным и представителям интеллигенции.

3. При оценке градостроительной роли монументов можно выделить следующие позиции: скульптура как композиционное ядро пространства, как часть мемориального комплекса, как структурный элемент входной группы, как визуальный ориентир.

4. Идейное содержание монументов позволяет обогащать семантику архитектурно-пространственной среды. Казанская монументальная пластика советского периода в большинстве случаев приобретает не только идеологическое, но и глубоко философское звучание, обогащая городское пространство различными смыслами, способствуя формированию неповторимого духа места.

#### Список литературы / References

1. Юрьева О. Ю. Социалистический реализм в произведениях монументальной скульптуры Советского Союза// Актуальные проблемы монументального искусства: сборник научных трудов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 219-226 [Yurieva O. Y. Socialist realism in the works of monumental sculpture of the Soviet Union // Topical problems of monumental art : a collection of scientific papers. – St. Petersburg : St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2023. – P. 219-226]. – EDN PEOANZ.
2. Котломанов А. О. "Ленинский план монументальной пропаганды" - феномен государственного паблик-арта / Terra Artis. Искусство и дизайн. – 2021. – № 4. – С. 62-76 [Kotlomanov A. O. "Lenin's plan of monumental propaganda" - the phenomenon of state public art // Terra Artis. Art and Design. – 2021. – No. 4. – P. 62-76]. – DOI 10.53273/27128768\_2021\_4\_62. – EDN JAAXSF.
3. Лекус Е. Ю. Советская монументальная скульптура: между свободой творчества и политическим жестом (на примере произведений В. И. Мухиной "Ветер" и "Рабочий и колхозница")// Вестник Московского государственного университета культуры и искусств. – 2022. – № 1(105). – С. 93-103 [Lekus E. Y. Soviet monumental sculpture: between freedom of creativity and a political gesture (on the example of V. I. Mukhina's works "The Wind" and "The Worker and the Collective farmer") // Bulletin of the Moscow State University of Culture and Arts. – 2022. – № 1(105). – P. 93-103]. – DOI 10.24412/1997-0803-2022-1105-93-103. – EDN RSDLMO.
4. Лекус Е. Ю. Скульптурные лениниана и сталиниана: особенности монументализации культа личности// Советское искусство и мировое художественное пространство: роль женщины в искусстве XX века : Материалы научно-практической конференции, посвященной выдающемуся скульптору-

<sup>1</sup> Хвойник И. Скульптура и архитектура // Вопросы синтеза искусств : Материалы первого творческого совещания архитекторов, скульпторов и живописцев. — Москва : ОГИЗ—ИЗОГИЗ, 1936. — С. 48—61.

- монументалисту Вере Игнатьевне Мухиной (1889-1953), Санкт-Петербург, 16 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия имени А.Л. Штиглица», 2021. – С. 13-22 [Lekus E. Y. Sculptural Leniniana and Staliniana: features of the monumentalization of the cult of the personality // Soviet art and the world art space: the role of women in the art of the twentieth century : Materials of a scientific and practical conference dedicated to the outstanding muralist Vera Ignatievna Mukhina (1889-1953), St. Petersburg, September 16, 2021. – St. Petersburg: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State Art and Industrial Academy named after A.L. Stieglitz", 2021. – P. 13-22]. – EDN NZLYQA.
5. Гейль В. В., Лешуков А. Г. Феномен монументальной тиражированной скульптуры в социокультурном пространстве советского города в 1930-1950-е гг. (на материалах г. Челябинска) // Вестник культуры и искусств. – 2022. – № 4(72). – С. 82-89 [Geil V. V., Leshukov A. G. The phenomenon of monumental replicated sculpture in the socio-cultural space of the Soviet city in the 1930s-1950s. (based on the materials of Chelyabinsk) // Bulletin of Culture and Arts. – 2022. – № 4(72). – P. 82-89]. – EDN LXACXN.
  6. Гейль В. В. Тиражированная монументальная скульптура советского периода : на материалах города Челябинска. Челябинский государственный институт культуры. – Челябинск : Челябинский государственный институт культуры, 2023. – 107 с [Geil V. V. Replicated monumental sculpture of the Soviet period : based on the materials of the city of Chelyabinsk. Chelyabinsk State Institute of Culture. – Chelyabinsk : Chelyabinsk State Institute of Culture, 2023. – 107 p.]. – ISBN 978-5-94839-837-2. – EDN QFUKXQ.
  7. Сазонов В. В. Единство монументальной скульптуры и среды в памятнике "Первостроителям Комсомольска-на-Амуре": к вопросу о проблематике раннего творчества В.Э. Горевого// Артикульт. – 2022. – № 1(45). – С. 18-24 [Sazonov V. V. The unity of monumental sculpture and the environment in the monument "To the first builders of Komsomolsk-upon-Amur": on the issue of the problems of early creativity of V.E. Gorev // Articult. – 2022. – № 1(45). – P. 18-24. – DOI 10.28995/2227-6165-2022-1-18-24]. – EDN MHBGZP.
  8. Кривошеева Т. Н., Хисамова Д. Д. Скульптура Татарстана: альбом [науч. ред. Р. Р. Султанова, авт. предисл. Ф. Ш. Хузин]. – Казань: Татар. кн. изд-во, 2022. – 319 с. : ил. [Krivosheeva T. N. Hisamova D. D. Sculpture of Tatarstan : album [scientific ed. by R. R. Sultanova, author's preface by F. Sh. Khuzin]. – Kazan : Tatar Publishing House, 2022. – 319 p. : il.].
  9. Попов А. Д. Создание мемориального комплекса "Героям Сталинградской битвы" на Мамаевом кургане: историческая память, искусство и советская монументальная пропаганда // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 209-221 [Popov A.D. The creation of the memorial complex "To the Heroes of the Battle of Stalingrad" on Mamaev Kurgan: historical memory, art and Soviet monumental propaganda // Bulletin of the Volgograd State University. Episode 4: The History. Regional studies. International relations. – 2023. – vol. 28, No. 1. – P. 209-221]. – DOI 10.15688/jvolsu4.2023.1.19. – EDN CWAMNR.
  10. Карагода К. П. Образы советской монументальной скульптуры в мелкой пластике: трансформация функций и эволюция смыслов // Наследие веков. – 2020. – № 3(23). – С. 14-28 [Karagoda K. P. Images of Soviet monumental sculpture in fine plastic: transformation of functions and evolution of meanings // Heritage of Centuries. – 2020. – № 3(23). – P. 14-28]. – DOI 10.36343/SB.2020.23.3.001. – EDN BYBYMG.
  11. Рычков А. В. Творчество скульптора О. М. Манизера в контексте художественных тенденций 1950-1980-х годов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2021. – № 1(61). – С. 103-107 [Rychkov A.V. The work of sculptor O. M. Manizer in the context of artistic trends of the 1950s-1980s // Design. Materials. Technology. –

2021. – № 1(61). – Р. 103-107]. – DOI 10.46418/1990-8997\_2021\_1(61)\_103\_107. – EDN IWGNNV.
12. Смирнова М. А., Волкова А. А. Скульптуры Веры Мухиной как олицетворение Советской эпохи// Modern Science. – 2019. – № 7-2. – С. 57-61 [Smirnova M. A., Volkova A. A. Sculptures of Vera Mukhina as the personification of the Soviet era// Modern Science. – 2019. – No. 7-2. – P. 57-61]. – EDN LHJBVD.
13. Флорковская А. К. Монументальные памятники Бориса Королева: вопросы архитектурного и скульптурного синтеза // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. – 2022. – № 4-3. – С. 51-65 [Florkovskaya A. K. Great monuments of Boris Korolev: issues of architectural and sculptural synthesis// Decorative art and the subject-spatial environment. Bulletin of the Russian State Pedagogical University named after S.G. Stroganov. - 2022. - No. 4-3. - P. 51-65]. – DOI 10.37485/1997-4663\_2022\_4\_3\_51\_65. – EDN ITKFTO.
14. Сиразеев Н. Р. К вопросу о феномене художественного синтеза архитектуры и монументальной скульптуры // Инновационная наука. – 2023. – № 9-2. – С. 82-88 [Sirazeev N. R. On the question of the phenomenon of artistic synthesis of architecture and monumental sculpture // Innovative science. – 2023. – No. 9-2. – P. 82-88]. – EDN CCUCJA.
15. N. Debruyne, G. Nazarska. Contentious heritage spaces in post-communist Bulgaria: Contesting two monuments in Sofia. *Journal of Historical Geography* (2023) 0305-7488 – <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2023.09.003>.
16. E. Ochman. Spaces of Nationhood and Contested Soviet War Monuments in Poland: The Warsaw Monument to the Brotherhood in Arms. In: Bevernage, B., Wouters, N. (eds). *The Palgrave Handbook of State-Sponsored History After 1945* (2018) 978-1-349-95305-9 – [https://doi.org/10.1057/978-1-349-95306-6\\_25](https://doi.org/10.1057/978-1-349-95306-6_25).
17. S. Dornhof. Disgraced Monuments. Burying and Unearthing Lenin and Lyautey. *Capdepón, U., Dornhof, S. (eds) Contested Urban Spaces* (2022) 978-3-030-87504-6 – [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87505-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87505-3_11).
18. C. Merewether. Rise and Fall of Monuments. *In the Sphere of The Soviets* (2021) 978-981-33-6573-5 – [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6574-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6574-2_5)
19. K. Medeuova. Culture of Remembrance in Kazakhstan at the Turn of the Twentieth to Twenty-First Centuries. *Sharipova, D., Bissenova, A., Burkhanov, A. (eds) Post-Colonial Approaches in Kazakhstan and Beyond* (2024) 978-981-99-8261-5 – [https://doi.org/10.1007/978-981-99-8262-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8262-2_5)
20. Assmann. (In)visible Monuments. What Makes Monuments Controversial? *Capdepón, U., Dornhof, S. (eds) Contested Urban Spaces* (2022) 978-3-030-87504-6 – [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87505-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87505-3_2)
21. Chloupek. Commemorative vigilance between totalitarianisms: Slovakia's 'Victims Warn' sculpture, from counter-monument to anti-monument. *Journal of Historical Geography* 81 (2023) 0305-7488 – <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2023.04.007>.
22. Tomaszewicz. Sculpture in Socialist Realism — Soviet Patterns and the Polish Reality. *Arts* 11(1) (2022) 2076-0752 – <https://doi.org/10.3390/arts11010006>
23. Закирова Т. Р. Развитие советского модернизма в архитектуре общественных зданий Казани второй половины 1950-х - 1960-е годы // Архитектон: известия вузов. – 2022. – № 2(78) [Zakirova T. R. The development of Soviet modernism in the architecture of public buildings in Kazan in the second half of the 1950s - 1960s // Architecton: News of universities. – 2022. – No. 2(78)]. – DOI 10.47055/1990-4126-2022-2(78)-13. – EDN QOBBTC.
24. Ибрагимова А.Ф. Место скульптуры в городской среде // Урбанистика: опыт исследований, современные практики, стратегия развития городов, Саратов, 11–12 мая 2017 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2017. – С. 100-101 [Ibragimova A.F. The place of sculpture in the urban environment // Urbanistics: research experience, modern practices, urban development strategy, Saratov, May 11-12, 2017. – Saratov: Saratov

- State Technical University named after Gagarin Yu.A., 2017. – P. 100-101]. – EDN ZTHADZ.
25. Khusnudinova, S., Faizrakhmanova G., Khusnudinov R. Tangible and intangible assets of city environment: architecture, city lighting and art aspects // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, April, 29 – May, 15, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012020. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012020. –EDN KMZZAK.

#### Информация об авторах

**Сайфуллина Ляйля Шавкатовна**, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [lasaif@mail.ru](mailto:lasaif@mail.ru), ORCID: 0009-0006-8052-4227

**Сиразеев Нияз Рустемович**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: [kniyaz.s@mail.ru](mailto:kniyaz.s@mail.ru), ORCID: 0009-0003-4970-3137

#### Information about the authors

**Lyayla Sh. Sayfullina**, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: [lasaif@mail.ru](mailto:lasaif@mail.ru), ORCID: 0009-0006-8052-4227

**Niyaz R. Sirazeev**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: [kniyaz.s@mail.ru](mailto:kniyaz.s@mail.ru), ORCID: 0009-0003-4970-3137

УДК: 72.03

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.20

EDN: TJLKSS



## Исторический обзор характера игровых видов спорта и их архитектурных объектов в странах Древнего мира

М.Я. Ганнам<sup>1</sup>, Е.И. Прокофьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. По мере развития общества развивался спорт. В средневековой Европе, например, среди рыцарей были популярны рыцарские поединки и другие виды боя, а в Азии боевые искусства и различные формы гимнастики практиковались как средства развития физической и умственной дисциплины. В современную эпоху спорт стал глобальным явлением, миллионы людей смотрят и принимают участие в различных мероприятиях, от футбола и баскетбола до гольфа и хоккея. По мере развития технологий спорт также принял новые формы, например, киберспорт, который включает в себя компьютерные игры и виртуальные соревнования. Целью статьи является обзор игровых видов спорта Древнего мира на базе анализа археологических памятников и сохранившихся спортивных сооружений. Задачи исследования: анализ видов спорта в Древнем Египте, у финикийцев; изучение особенностей спортивных игр греческих царей и воинов; обзор видов спорта римлян. Результаты. Авторы установили, что древние египтяне и финикийцы, как правило, проводили свои спортивные игры на открытых площадках перед храмами, а также во дворах царских дворцов. Древние греки начинают строить спортивные сооружения в соответствии с их прямым назначением, при этом предпочитают открытые спортивные площадки на свежем воздухе. Древние римляне продолжают традицию проведения игр на открытом воздухе, для этих целей возводятся большие амфитеатры, однако некоторые виды спортивных игр проводятся в закрытых помещениях римских бань.

**Ключевые слова:** архитектура, история, сооружения, спорт, древний мир

**Для цитирования:** Ганнам М.Я., Прокофьев Е.И. Исторический обзор характера игровых видов спорта и их архитектурных объектов в странах Древнего мира // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 243-252, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.20, EDN: TJLKSS

## Historical overview of the nature of team sports and their architectural structures in the countries of the Ancient World

М. Ya. Ghannam<sup>1</sup>, E.I. Prokofiev<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** Problem statement. As society developed, sports developed either. In medieval Europe, for example, jousting and other types of combat were popular among knights, and in Asia martial arts and various forms of gymnastics were practiced as a means of developing physical and mental discipline. In the modern era, sport has become a global phenomenon, with millions of people watching and taking part in various activities, from football and basketball to golf and hockey. As technology has evolved, sports have also taken on new forms, such as e-sports, which include computer games and virtual competitions. The purpose of the article is to review the game sports of the Ancient world based on the analysis of archaeological sites and preserved sports facilities. Research objectives: analysis of sports in Ancient Egypt, among the

Phoenicians in particular; study of the features of the sports games of the Greek kings and warriors; review of the sports of the Romans. *Results.* The authors have established that the ancient Egyptians and Phoenicians as a rule held their sports games in open squares in front of temples, as well as in the courtyards of royal palaces. The ancient Greeks began to build sports facilities in accordance with their direct purpose, while preferring outdoor sports grounds in the fresh air. The ancient Romans continue the tradition of holding outdoor games, large amphitheaters are being built for these purposes, but some types of sports games are held indoors in Roman baths.

**Keywords:** Architecture, history, facilities, sports, ancient world

**For citation:** Ghannam M. Ya., Prokofiev E.I. Historical overview of the nature of team sports and their architectural structures in the countries of the Ancient World // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 243-252, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.20, EDN: TJLKSS

## 1. Введение

Спорт является частью жизни человека с древних времен [1-3]. Истоки многих видов спорта можно проследить тысячи лет назад [4]. От борьбы в Древнем Египте и Греции до гонок на колесницах в Риме – спорт был неотъемлемой частью человеческого опыта. Со временем виды спорта, которыми занимаются люди, менялись и развивались, создавая новые игры и занятия. Следует отметить то, что спорт на протяжении веков оказывал влияние на древние цивилизации. Спортивные игры не только показывают физическую активность, но и отражают ценности и убеждения, которые управляют обществом на определённом развитии цивилизации.

Пиктографические изображения бега и борьбы были найдены во французских пещерах Ласко в эпоху палеолита, то есть более семнадцати тысяч лет назад. Также в Монголии были найдены древности, относящиеся к эпохе неолита, содержащие нарисованные изображения, показывающие существование Борцовских поединков при наличии толпы. В Вади-Суре, недалеко от региона Гильф-эль-Кебир в Ливии, плаванием и стрельбой из лука практиковали еще в 6000 г. до н.э. Затем некоторыми видами спорта практиковались в регионах Шумера, Греции и Древнего Египта.

Одним из примеров древнего спорта является древнегреческая легкая атлетика. Легкая атлетика была важной частью древнегреческой культуры и проводилась в рамках Олимпийских игр каждые четыре года. Древнегреческая легкая атлетика включала спринт, прыжки в длину, прыжки с шестом, метание копья, метание диска, борьбу и бокс. Другой пример древнего вида спорта – римская борьба. Римская борьба была популярным видом спорта в Древнем Риме, ее практиковали на полях сражений и на спортивных стадионах. Римская борьба была жестоким видом спорта, часто заканчивавшимся смертью.

Трудно сказать, какой вид спорта был первым в мире. Однако очевидно, что люди занимались спортом на протяжении тысячелетий и что спорт был важной частью культуры и общества во всем мире.

Занятия спортом требуют создания необходимой инфраструктуры. В Древнем мире для спортивных соревнований использовали открытые арены, амфитеатры, дворцы. Современные спортивные сооружения разнообразны как по внешнему виду, так и по функциональному наполнению [5-7]. Как и на начальных этапах развития цивилизаций, так и современном обществе строительство крупномасштабных спортивных объектов невозможно без участия муниципалитетов [8]. Появление эффектных зданий ведет к трансформации городской среды, делает ее более удобной для жизни [9-11].

Объекты спортивной инфраструктуры Древнего мира для современного человека являются памятниками архитектуры, требующими охраны и бережного обращения [12,13]. Основной задачей современных спортивных сооружений остается окупаемость за счет повышения инвестиционной привлекательности [14].

Целью статьи является выполнение исторического обзора игровых видов спорта Древнего мира. Задачи исследования: анализ видов спорта в Древнем Египте, у

финикийцев; изучение особенностей спортивных игр греческих царей и воинов; обзор видов спорта римлян.

## 2. Материалы и методы

В процессе проведения исследования был использован метод анализа архивных материалов, интернет-источников, был выполнен анализ библиографических источников, синтез информации и ее классификация.

Качественный контент-анализ статей включает в себя: подбор публикаций по ключевым словам, формирование рабочей гипотезы, выводы по полученным результатам. В процессе выполнения анализа каждая статья была детально изучена. В результате синтеза были сформированы итоговые выводы. Метод классификации позволил собрать графические объекты в соответствии с теми игровыми видами спорта, которые были распространены в той или стране в древности.

## 3. Результаты и обсуждение

Древние египтяне были одними из первых народов, которые начали заниматься различными видами спорта, которые составляют основу многих существующих сегодня спортивных игр, что позволяло им заниматься разными их видами (рис. 1).



Рис. 1. Старая спортивная графика

(Источник: <https://www.pinterest.com/antallas/amazigh-history/>)

Fig. 1. Old sports graphics

(Source: <https://www.pinterest.com/antallas/amazigh-history/>)

Древние египтяне устраивали свои спортивные игры на открытых площадях перед храмами в религиозные сезоны и праздники, а также во дворах царских дворцов, и у них не было спортивных сооружений в том смысле, как это понимается сейчас. Что касается императоров и царей, то в дни своей коронации они устраивали перед своим народом спортивные шоу. Данная информация подтверждается результатами раскопок царских дворцов, расшифрованными иероглифическими рисунками. Организация спортивных шоу к царскому празднику спортивных тренировок для молодежи и сыновей правящего класса проводилась во дворе Амона-Ра – один из четырех главных, залов, составляющих королевский Карнакский храм в Луксоре (Египет). Двор был посвящен поклонению добруму богу Амону. Строительство возглавлял древнеегипетский зодчий Энини шестнадцатом веке до нашей эры на берегу реки Нил. Площадь двора около 250 000 квадратных метров.

На протяжении всей истории землю Сирии населяли многие древние народы, и многие великие цивилизации процветали более 12 000 лет назад, такие как шумерская, аккадская, аморийская, вавилонская, арамейская, финикийская, ассирийская, персидская, римская и другие цивилизации. Большинство этих цивилизаций были процветающими в военном, экономическом, культурном и спортивном отношении. Жители занимались разными видами спорта на площадях, в храмах, но для этих видов спорта не были устроены специальные площадки.

Никаких вещественных доказательств существования стадионов, сооружений и спортивных арен не было обнаружено, за исключением спортивного стадиона для игр возле храма финикийских богов города Амрит. Среди видов спорта, которые практиковались в Амрите, были бег трусцой, прыжки, метание, борьба. Игры Амрита также включали водные виды спорта плавание, гребля, ныряние в устье реки Амрит,

которая протекала в 700 метрах от стадиона. Финикийский спорт был основой греческого спорта. Финикийцы проводили возле храмов религиозные игры, похожие на древние Олимпийские игры.

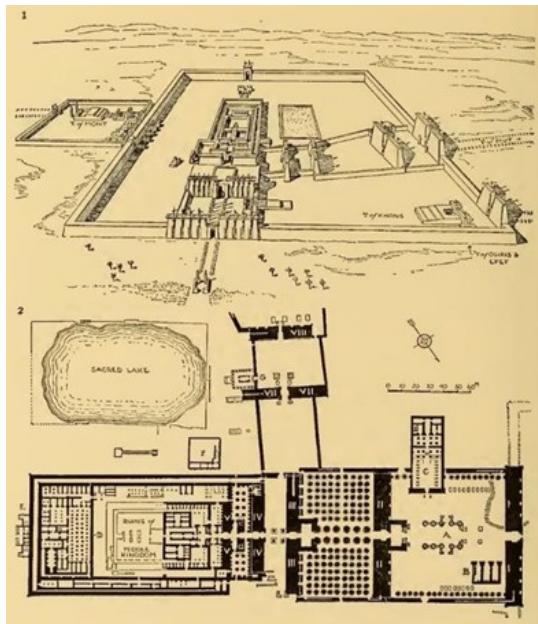


Рис. 2. Двор Амона-Ра

(Источник: <https://www.pinterest.com/pin/mosnr-tempalom-kzpbirodalom-kre-xvixii-sz-karnak--551268810622474742/>)

Fig. 2. The Court of Amon-Ra

(Source: <https://www.pinterest.com/pin/mosnr-tempalom-kzpbirodalom-kre-xvixii-sz-karnak--551268810622474742/>)

Стадион и храм Амрит были построены во время строительства города, примерно в 15 веке до нашей эры. Этот стадион является доказательством существования финикийских видов спорта, прецедента греческих видов спорта, поскольку он был посвящен великим спортивным праздникам, главными из которых являются стадионные игры (бег, подстановочные знаки, метания, борьба). Стадион расположен в естественной впадине между двумя холмами, где геометрия его выступов указывает на то, что он имел форму буквы У. Длина стадиона 250 м, ширина 50 м. Его окружают десять ступеней высотой 0,6 м. С северной стороны они вырыты в известняке, а с южной стороны половина ступеней – в камнях, а другая часть была завершена каменным сооружением, остатки которого видны и по сей день. С восточной стороны ступени отходят в две стороны, образуя арку, в которой находятся два входа на стадион. Ширина каждого входа составляет 3,5 м. вместимость стадиона – 11200 зрителей (40 см на человека)

Греция была страной, в которой физический спорт достиг наивысшего уровня процветания и прогресса в древние времена. Нет сомнений в том, что ни одна страна в мировой истории не достигла уровня Греции в поощрении развития и практики физического спорта. У греков существовало два основных метода физического воспитания. За грубым и строгим методом, основанном на военной подготовке, последовали народы Спарты и Крита. Целью второго метода было развитие гармонии и симметрии тела, этому следовали жители Афин.

Греки, особенно афиняне, считали, что укрепление ума и души должно сопровождаться укреплением тела, но в то же время тела должны расти гармонично и красиво. Они не пытались специализироваться на каком-либо виде спорта, а скорее хотели помочь юношам заниматься полезными играми, такими как: борьба, бег, прыжки, метание цилиндров и мячей, танцы с оружием, гонки на колесницах, хоккей, бокс и другие, игры. Каждый греческий город имел свой стадион, и игры, проводившиеся на

нем, преподносились богам после принесения жертв и жертвоприношений, согласно религиозным ритуалам, соблюдавшимся в ту эпоху.

Олимпийские игры были самым важным праздником физического спорта в Греции. Поскольку греки считали их национальным праздником, во время него прекращались бои, и в нем принимали участие чемпионы спорта из разных уголков страны, причем первый победитель среди них получал приз - оливковую ветвь. Город, откуда прибыл герой-победитель, отмечал его возвращение чудесным праздником, и его жители, не колеблясь, сносили часть стен, чтобы воздвигнуть триумфальную арку для его вхождения в город.

Греция праздновала Олимпийские игры каждые четыре года, а первое празднование состоялось в 776 г. до н.э. Греция считается колыбелью этих игр и первой страной в мире, которая устраивала их с начала истории, и продолжала их проведение до первого появления христианства. В табл. 1 приведены несколько спортивных игр, которые практиковали греческие цари, воины.

Таблица 1

## Спортивные игры греческих царей, воинов

Изображение на амфорах	Описание
	Гонки на колесницах с двумя или четырьмя лошадьми, на мулах. Они состояли из 12 циклов забегов по ипподрому длиной 9 миль.
	Степная гонка, гонка доспехов-соревнования по бегу
	Кулечный бокс, который не имел раундов и заканчивался поражением одного из игроков. В нем не было весовых рейтингов, как в современном боксе
	Скачки для взрослых лошадей и скачки для молодых лошадей. Они состояли из шести кругов по ипподрому (дистанция 4,5 мили).

Греки были заинтересованы в строительстве спортивных сооружений в соответствии с их прямыми функциями. Для создания спортивных центров они выбирали самые высокие места, такие как холмы. Матчи проводились на открытом воздухе.

Плато Акрополь представляет собой олимпийскую деревню площадью 750 x 50 футов шириной, имеет двое ворот: одни на северо-западе, другие на юго-западе; четыре культовых сооружения (храм Зевса, храм Геры, Храм Гераума - храм богини Матроны - и михраб царя Пелопса). (рис. 3). Здания для управления праздником и приема официальных делегаций, администраторов и руководителей команд были возведены поблизости из этих зданий, а вокруг этого религиозного района были созданы такие сооружения как гимназия, ипподром, стадион, Палестра.

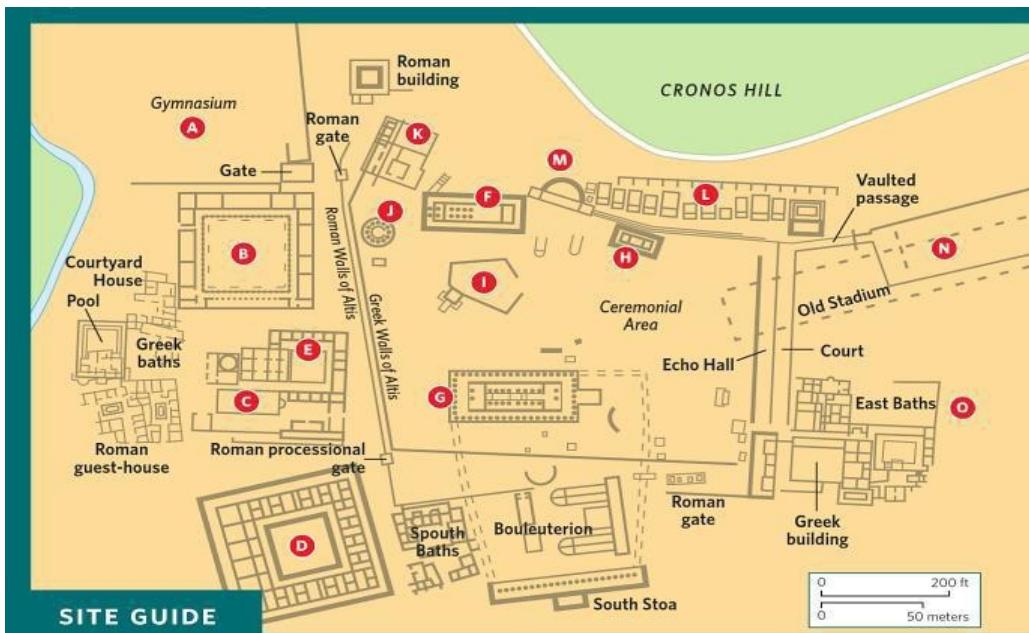


Рис. 3. Горизонтальная проекция Олимпийской деревни на плато Акрополь.

(Источник: <https://ancient-olympia.weebly.com/territory-and-religion.html>)

Fig. 3. Horizontal projection of the Olympic Village on the Acropolis plateau  
(Source: <https://ancient-olympia.weebly.com/territory-and-religion.html>)

В Древнем Риме спорт приобретал широкую популярность, так как был увлекательным и зрелищным. Римская концепция спорта совершенно отличалась от концепции их греческих соседей, которым принадлежали Олимпийские игры. Для римлян спорт был удивительным и опасным средством развлечения, в отличие от афинян, которые смотрели на него с более духовной точки зрения и стремились к нравственному возвышению и славе самих спортсменов. Спортивные мероприятия в Древней Греции представляли собой прежде всего неопасные и бескровные соревнования. Афиняне видели в физических упражнениях способ создать идеальное сочетание внешней красоты и благородства духа. В результате римского влияния святость спорта, обычная черта спортивной деятельности в Греции, постепенно была заменена увеселительным зрелищем и безудержным стремлением создать состояние кровожадного ожидания. Хотя виды спорта, практикуемые в Риме, также включали в себя те виды спорта, которые были приняты на Олимпийских играх в Греции, единственную популярность завоевали только более жестокие виды спорта, такие как бокс и борьба.

Римляне особенно ценили вид спорта под названием «панкратион» – боевой вид спорта греческого происхождения, который представлял собой смесь борьбы и бокса. Официально представленный как вид спорта на Олимпийских играх в Греции в 648 году нашей эры, панкратион представлял собой комплексный вид единоборства, допускавший использование всех боевых приемов, за исключением кусания и выдавливания глаз противника, которые строго наказывались поркой.

Любовь к жестоким спортивным соревнованиям в Древнем Риме прослеживается в огромной популярности гладиаторов среди всего римского народа. Степень этой популярности можно также увидеть, в огромном количестве больших террас на спортивных сооружениях, разбросанных по всему миру, включая Италию, Европу и даже на Ближнем Востоке и в Африке.- В следующей таблице показаны различные виды спорта, которые практиковались в империи. (табл. 2).

Таблица 2

## Древние виды спорта, которыми занимались римляне

Изображения	Наименования /описания
	Борьба - вид спорта, которым занимались в борцовских залах римских бань.
	Боксом также занимались в римских банях
	Игры с мячом: гандбол, футбол, хоккей
	Бег
	Гонки на колесницах
	Это битва между рабами и свирепыми хищниками, которая обычно проходила в римских амфитеатрах.

Древние римляне практиковали различные виды спорта, которые включали как занятия спортом в помещении, так и на открытом воздухе. Римляне также занимались многими древнегреческими видами спорта, а также ритуальными выступлениями для демонстрации физической силы и выносливости. У богатых римлян были большие игровые площадки и сооружения, такие как спортивные залы и палестра.

Одним из самых известных римских спортивных сооружений является Колизей, или так называемый Амфитеатр Флавиев (по-латыни: Amphitrum Flavium; по-итальянски: Anfiteatro Flavio или Colosseo), представляющий собой гигантский римский амфитеатр, расположенный в центре Рима (рис. 4).

Во времена правления императора Флавио Веспасиана строительство было в основном завершено в 1980-х годах., С начала строительства и до сих пор здание претерпело множество изменений с точки зрения использования, а также архитектурной формы здания.

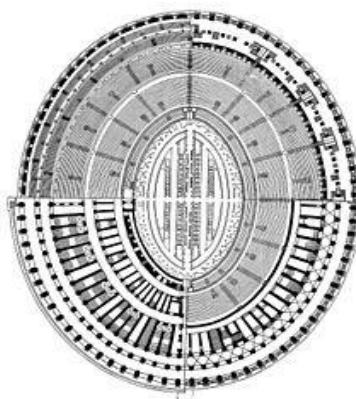
Римская империя, греческая, египетская и финикийская цивилизации отличались богатой и выдающейся спортивной историей, поскольку спорт составлял неотъемлемую часть жизни и культуры людей. Их спортивные занятия отражали их социальное и культурное развитие и оказали значительное влияние на более поздние цивилизации.

В Риме спорт считался способом улучшения физической подготовки и воспитания соревновательного духа и был очень популярен на цирковых аренах и в общественных местах. В Греции Олимпийские игры были выражением единства греческого народа и поощрением честных спортивных соревнований. Что касается фараонов, то они

занимались спортом, чтобы поклоняться богам и утверждать военную мощь. У финикийцев спорт отражал их преданность торговле и традиционным ремеслам.



а) Картина текущей ситуации с воздуха



б) Четыре этажа объединены в один план

Рис. 4. Колизей.

(Источник: а) [https://avatars.dzeninfra.ru/get-zен\\_doc/4761941/pub\\_612f68232d2fe92dae631dc7\\_612f68c7c89f2541d83a85ce/scale\\_1200](https://avatars.dzeninfra.ru/get-zен_doc/4761941/pub_612f68232d2fe92dae631dc7_612f68c7c89f2541d83a85ce/scale_1200)  
б) [https://kannelura.ru/dr/hits\\_25\\_02.jpg](https://kannelura.ru/dr/hits_25_02.jpg)

Fig. 4. Colloseum

a) Picture of the current situation from the air      b) Four floors combined into one plan  
(Source: a) [https://avatars.dzeninfra.ru/get-zен\\_doc/4761941/pub\\_612f68232d2fe92dae631dc7\\_612f68c7c89f2541d83a85ce/scale\\_1200](https://avatars.dzeninfra.ru/get-zен_doc/4761941/pub_612f68232d2fe92dae631dc7_612f68c7c89f2541d83a85ce/scale_1200)  
b) [https://kannelura.ru/dr/hits\\_25\\_02.jpg](https://kannelura.ru/dr/hits_25_02.jpg)

Изучая историю спорта в этих цивилизациях, мы осознаём важность спорта как культурного и социального явления, преодолевающего время, и то, как он способствует формированию идентичности народов и укреплению культурных связей между ними. Эти цивилизации остаются для нас источником вдохновения в понимании истоков спорта и его важности в нашей современной жизни, каждая цивилизация внесла свой вклад в развитие различных спортивных игр и занятий и оказала значительное влияние на развитие мировой спортивной культуры. Выполненное исследование позволило определить взаимосвязь между игровыми видами спорта и эволюцией архитектуры спортивных объектов древности от дворцовых дворов до амфитеатров. Данная статья, в отличие от работ других авторов, рассматривает комплексно вопросы развития спорта и архитектуры спортивных сооружений[15].

#### 4. Заключение

- Авторы установили, что древние египтяне и финикийцы устраивали свои спортивные игры на открытых площадях перед храмами, а также во дворах царских дворцов.
- Древние греки начинают строить спортивные сооружения в соответствии с их прямым назначением, предпочитают проводить игры на открытом воздухе.
- Древние римляне также продолжают традицию проведения игр на открытом воздухе, для этих целей возводятся большие амфитеатры, однако некоторые виды спортивных игр проводятся в закрытых помещениях римских бань.

#### Список литературы / References

- Касинцев С.А., Гончарова Н.А., Пчела И.В., Харченко Е.В., Рустамов Н.М. Физическая культура и спорт на Дальнем Востоке в 50-е годы XX века // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгагта. – 2020. – № 8(186). – С. 134-138. – [Kasintsev S.A., Goncharova N.A., Pchela I.V., Kharchenko E.V., Rustamov N.M. Physical training and sport in the Far East in the 50s of XX century // Scientific notes of

- the University named after. P.F. Lesgafta. – 2020. – No. 8(186). – P. 134-138.] DOI 10.34835/issn.2308-1961.2020.8.p134-138. – EDN BDKBJC.
2. Вайсбург А. В. Любительский спорт как вид досуга среди населения: результаты социологического исследования жителей города Твери // Вестник экономики, права и социологии. – 2023. – № 3. – С. 128-130. – [Weisburg A.V. Amateur sports as a form of leisure among the population: results of a sociological study of residents of the city of Tver // Bulletin of Economics, Law and Sociology. – 2023. – No. 3. – P. 128-130.] EDN PWKKWC.
  3. Глущенко Е. А. Проблемы формирования досуга молодежи и развитие личности через спорт // Вестник современных исследований. – 2018. – № 5.3(20). – С. 164-166. [Glushenko E. A. Problems of youth leisure formation and personality development through sports // Bulletin of modern research. – 2018. – No. 5.3(20). – P. 164-166.] – EDN XTTVVR.
  4. Карапаев О. Р., Карапаева Е. С., Кузнецов А. С. Аспекты технического развития и сравнительный анализ спортивных сооружений Древнего мира и современности // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 18. – С. 350-352. [Karataev O. R., Karataeva E. S., Kuznetsov A. S. Aspects of technical development and comparative analysis of sports facilities of the Ancient world and modern times // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2014. – T. 17, No. 18. – P. 350-352] – EDN SXYIFV.
  5. Арсентьева Ю. П., Залетова Е. А., Тепавчевич Р. Концепция развития спортивной инфраструктуры в Г. Казани в рамках подготовки к чемпионату мира по водным видам спорта 2025 года // Архитектура и строительство России. – 2022. – № 2(242). – С. 6-13. [Arsentyeva Yu. P., Zaletova E. A., Tepavchevich R. The concept of development of sports infrastructure in Kazan in preparation for the 2025 World Aquatics Championships // Architecture and Construction of Russia. – 2022. – No. 2(242). – P. 6-13.] – EDN LBRRMW.
  6. Бирюков В. В., Забалуева Т. Р., Захаров А. В. Проектирование большепролётных многоэтажных спортивных зданий// Архитектура и строительство России. – 2011. – № 9. – С. 12-19 [Biryukov V.V., Zabalueva T.R., Zakharov A.V. Design of long-span multi-storey sports buildings // Architecture and construction of Russia. – 2011. – No. 9. – P. 12-19]. – EDN OGXISZ.
  7. Амельянц А. А., Пыльский Ю. В. Роль комплексов экстремальных видов спорта в структуре крупных городов// Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. – 2023. – № 1(1). – С. 125-134. [Amelyants A. A., Pylsky Yu. V. The role of extreme sports complexes in the structure of large cities // Architecture. Restoration. Design. Urbanism. – 2023. – No. 1(1). – P. 125-134.] – EDN KWZZHS.
  8. Кустова А. С. Повышение роли муниципального управления в сфере организации массового спорта и досуга населения // Энigma. – 2020. – № 17-1. – С. 109-114. [Kustova A. S. Increasing the role of municipal government in the sphere of organizing mass sports and leisure of the population // Enigma. – 2020. – No. 17-1. – P. 109-114.] – EDN NAMFVI.
  9. Apostolos Anagnostopoulos. Designing runnable cities//Transportation Engineering 16 (2024) 100238, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100238>
  10. Zakirova Y. A. Faizrakhmanova G. R., Khusnutdinova S. R. Transformation of the City Environment: Functional-Planning and Territorial Aspects// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019", Vladivostok, October, 01–04, 2019. Vol. 753, 4, Chapter 3. – Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 042069. – DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042069. – EDN QDLHJA.
  11. Khusnutdinova S., Zakirova Ju., Ulengov R., Khusnutdinov R. Policentricity as a way to sustainable development of the city (The case-study of the city of kazan)// 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, June, 29 – July, 05, 2017. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Limited Liability Company

- STEF92 Technologies, 2017. – P. 603-610. – DOI 10.5593/sgem2017/53/S21.075. – EDN GIRBCA.
12. Khaled Abdul-Aziz Osman. Heritage conservation management in Egypt A review of the current and proposed situation to amend it// Ain Shams Engineering Journal 9 (2018) 2907–2916, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.10.002>
13. H. Derya Arslan, Kemal Yıldırım. Perceptual evaluation of stadium fac, ades// Alexandria Engineering Journal (2023) 66, 391–404, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.015>
14. Медяник Ю. В., Шагиахметова Э. И. Инвестиционная привлекательность строительства объектов социальной инфраструктуры в регионах// Региональные проблемы преобразования экономики. – 2022. – № 8(142). – С. 32-40. [Medyanik Yu. V., Shagiakhmetova E. I. Investment attractiveness of the construction of social infrastructure facilities in the regions // Regional problems of economic transformation. – 2022. – No. 8(142). – P. 32-40.] – DOI 10.26726/1812-7096-2022-8-32-40. – EDN ZHZPDW.
15. Erica Lau, Huiying (Cynthia) Hou, Joseph H.K. Lai, David Edwards, Nicholas Chileshe. User-centric analytic approach to evaluate the performance of sports facilities: A study of swimming pools// Journal of Building Engineering, Volume 44, December 2021, 102951, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102951>

### Информация об авторах

**Ганнам Мухамад Яман**, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
*Email: yaman.ghannam96@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8783-4881*

**Прокофьев Евгений Иванович**, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
*Email: zhenya.prokofiev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0609-7176*

### Information about the authors

**Mohammad Yaman Ghannam**, postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

*Email: yaman.ghannam96@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8783-4881*

**Evgeniy I. Prokofiev**, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

*Email: zhenya.prokofiev@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0609-7176*

УДК: 72.033

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.21

EDN:TQVYNQ



## Башня Сююмбике: стилистические особенности в контексте романо-итальянских, сельджукских, мамлюкских влияний и булгаро-татарских традиций

Г. Н. Айдарова<sup>1</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Постановка задачи. Башня Сююмбике - выдающийся памятник архитектуры всемирного значения; период ее строительства достоверно не известен. Цель исследования заключается в выявлении стилистических особенностей Башни Сююмбике, позволяющих выдвинуть научно обоснованную гипотезу о периоде ее строительства. В задачи исследования входят выявление архитектурных элементов Башни Сююмбике; поиск аналогичных архитектурных элементов в объектах европейского и восточно-мусульманского средневековья, определение композиционно - стилевой принадлежности Башни Сююмбике.

**Результаты.** Впервые вводятся в научный оборот аналитические материалы натурного и сопоставительного анализа Башни Сююмбике по 23 архитектурным элементам. В табличной форме приведены 106 архитектурных объектов из европейского и восточно-мусульманского средневековья, имеющих аналогичные архитектурные элементы. Научной новизной является методика стилистического анализа, основанная на системном выявлении, классификации и сопоставлении архитектурных элементов Башни Сююмбике с архитектурными элементами европейского (XI-XVI вв.) и восточно-мусульманского (VIII-XVI вв.) средневековья. Установлено, что архитектурная тектоника, пропорционально-композиционный строй Башни Сююмбике основаны на принципах подобия треугольников (триангуляция), характерных для европейской готики.

**Выводы.** Выдвинут научно обоснованный тезис о том, что по стилеобразующим характеристикам Башня Сююмбике могла быть построена по проекту выдающегося зодчего в период Казанского ханства, в диапазоне конца XV- первой половины XVI вв., как объект гражданской архитектуры культового и светского назначения. Стилистические особенности Башни Сююмбике заключаются в творческом осмыслинии романских, готических, арабо-мусульманских, сельджукских, мамлюкских, османских влияний и золотоордынских композиционно-стилистических традиций, в проявлении регионального стиля,нского для самостоятельной архитектурной школы.

**Ключевые слова:** архитектурный стиль, сводная таблица архитектурных элементов, аналоги европейского и восточно-мусульманского средневековья, золотоордынские традиции.

**Для цитирования:** Айдарова Г.Н. Башня Сююмбике: стилистические особенности в контексте романо-итальянских, сельджукских, арабо-мамлюкских влияний и булгаро-татарских традиций // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 253-268, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.21, EDN: TQVYNQ

# Syuyumbike Tower: Stylistic Features in the Context of Romanesque-Italian, Seljuk, Arab-Mamluk Influences and Bulgar-Tatar Traditions

G.N. Aidarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

*Problem statement.* The Syuyumbike Tower is an outstanding architectural monument of worldwide importance. The period of its construction is not reliably established. The purpose of the study is to identify the stylistic features of the Syuyumbike Tower to put forward a scientifically based hypothesis about the period of its construction. The objectives of the study include identification the architectural elements of the Syuyumbike Tower; identification of similar architectural elements in the buildings of the European and Eastern Muslim Middle Ages for comparative analysis, determination of the style and composition of the Syuyumbike Tower.

*Results.* For the first time, the full-scale and comparative analysis of the Syuyumbike Tower on 23 architectural elements is introduced. In tabular form, 106 architectural buildings from the European (41) and Eastern Muslim (65) Middle Ages, with similar architectural elements, are presented. The scientific novelty of this study is represented by the methodology of stylistic analysis based on the systematic identification, classification and comparison of the architectural elements of the Syuyumbike Tower with the architectural elements of the European (XI-XVI) and Eastern Muslim Middle Ages (VIII-XVI). We found out that the architectural tectonics and proportional and compositional structure of the Syuyumbike Tower are based on the principles of similarity of triangles (triangulation), which are characteristic of European Gothic.

*Conclusions.* A scientifically substantiated hypothesis is put forward that based on the style-forming characteristics, the Syuyumbike Tower could have been built according to the project of an outstanding architect in the period of the Kazan Khanate, in the range of the end of XV – the first half of XVI centuries as an object of civil architecture of religious and secular purposes. The stylistic features of the Syuyumbike Tower lie in the creative interpretation of Romanesque, Gothic, Arab-Muslim, Seljuk, Mamluk, Ottoman influences and the Golden Horde compositional and stylistic traditions, in the manifestation of the regional style characteristic of an independent architectural school.

**Keywords:** architectural style, summary table of architectural elements, analogues of the European and Eastern Muslim Middle Ages, Golden Horde traditions

**For citation:** Aidarova G.N. Syuyumbike Tower: Stylistic Features in the Context of Romanesque-Italian, Seljuk, Arab-Mamluk Influences and Bulgar-Tatar Traditions // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 253-268, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.21, EDN: TQVYNQ

## 1. Введение

Происхождение и назначение Башни Сююмбике остается дискуссионным вопросом на протяжении более двух столетий, датировка колеблется в пределах XV – начала XVIII веков. Бесспорных сведений ввиду утраты архивов Казанского ханства, Приказа Казанского дворца и др. не сохранилось. Вместе с тем, XVIII век является периодом истории России, достаточно обеспеченным массовыми документальными источниками, но информация о Башне Сююмбике в них отсутствует.

Новейшие исследования, сужающие хронологические рамки атрибутирования Башни Сююмбике [1], позволяют выстраивать новые допущения и не рассматривать предположения, относительно происхождения башни в Петровский период - период основания Казанской губернии. В связи с этим представляется необходимым дальнейшие

проверки гипотезы о происхождении башни Сююмбике в период Казанского ханства (1438-1552 гг).

Для этого необходимо исследовать синхронные явления в архитектуре европейского и восточно-мусульманского средневековья, чтобы сопоставить их со стилевыми характеристиками Башни Сююмбике. Если архитектурные элементы Башни Сююмбике соответствуют архитектурным элементам средневековья, то и происхождение башни Сююмбике должно быть в контексте стиля данной эпохи, при всем различии их региональных проявлений.

Теоретической базой послужили труды по архитектуре европейского и восточно-мусульманского средневековья таких авторов как: Огюст Шуази, фундаментальные исследования которого не утратили своего значения, особенно, в вопросах влияния архитектуры мусульманских стран на происхождение романского и готического искусства [2], что подтверждается в трудах других ученых. Так, Диана Дарк считает, что утвердившееся в науке мнение об односторонности влияния западно-европейской архитектуры на архитектуру Востока достаточно активно пересматривается: многие черты готической архитектуры являются плодом арабо-исламского влияния, так как происходило взаимообогащение Запада архитектурным опытом и идеями Востока[3].

Средневековая культура мусульманского Востока, ее особенности, освещались в трудах В.А. Гордлевского, отмечавшего влияние сельджуков на золотоордынскую и османскую культуры [4]; Е.И. Кононенко заостряет проблему замалчивания сельджукского этапа развития мусульманской архитектуры, роль местных школ в ее формировании, что, по его мнению, обедняет представления о развитии мусульманской архитектуры в целом [5]; Шейла Блэр дает обзор региональных особенностей архитектурных школ Ближнего и Среднего Востока (Ирана, Сирии, Анатолии, Африки, Центральной Азии и др.), выделяя в них региональные признаки отдельных архитектурных элементов, декора и орнамента [6].

Труды, посвященные проявлению «итальянанизмов» в русской архитектуре, представлены такими исследователями как: А.Л. Баталов, раскрывший влияние итальянской архитектуры на русскую архитектуру рубежа XVI-XVII вв. и формирование на этой основе ее самостоятельного художественного языка [7]; С.М. Земцов, исследовавший творчество итальянских архитекторов в России, выявивший их имена и очередность появления в Москве, Нижнем Новгороде, Пскове (Антон Фрязин, Аристотель Рудольфе Фио-раванти, Марко Фрязин, Пьетро Антонио Солари, Петр Франциск Фрязин, Алоизио да Каркано, Алевиз Новый, Джон-Баттиста делла Вольпе, Петрок Малый) [8]; С.С. Подъяпольский, определивший влияние итальянской школы на архитектуру Англии, Франции, Германии, Испании, Чехии, Венгрии, России ,в частности, отметил работу Алевиза Нового в Бахчисарайском дворце для крымского хана Менгли-Гирея в 1503 году [9].

Исследованиями Х.Г. Надыровой выявлены архитектурно-градостроительные традиции и региональные особенности золотоордынских городов Волжской Булгарии, отличавшие и одновременно сближавшие их с городами Восточной Европы и Евразии [10]. Э.Д. Зиливинская выделяет общие для разных регионов Золотой Орды принципы создания культовой архитектуры, а также единство в деталях архитектурного стиля [11]. В трудах С.С. Айдарова исследованы регионально-национальные традиции булгаро-татарского средневековья, разработаны графические реконструкции архитектурного облика основных объектов столичных городов Волжской и Золотоордынской Булгарии и Казанского ханства: Биляра, Булгара, Казани [12].

Стилистические особенности Башни Сююмбике затрагивали в своих исследованиях: И. Э. Грабарь, считавший ее произведением XVII века[13]; проф. С.С. Айдаров, относивший Башню Сююмбике к рубежу XVII-XVIII вв. [14]; Н.Х. Халитов, считавший ее объектом первой трети XVIII века, отмечая в ней при этом некоторые черты мусульманской архитектуры [15]. Самую раннюю датировку (XV в.) отводит Башне Сююмбике проф. И.Н. Агишева, допуская в ее облике и более поздние стилистические изменения [16].

Ценным вкладом являются исследования Башни Сююмбике, проведенные группой архитекторов в 1944 году под руководством проф. М.М. Синявера, который на основе

выполненных им обмеров, сделал заключение о том, что архитектурные формы башни Сююмбике отражают формы допетровского периода [17]; архитектор А.А. Трофимов, на основе обмеров М.М. Синявера, выполнил пропорциональный анализ башни Сююмбике, отметив в заключении ее высокие художественные качества, связанные с традициями русского допетровского зодчества [18]; академик А.В. Щусев относил башню к XVII веку, допуская ее более раннее происхождение и участие в строительстве местных мастеров [19]; К середине XVII века относил Башню Сююмбике и проф. В.В. Егерев [20].

Комплексного стилистического исследования архитектуры Башни Сююмбике, на основе системного выявления и сопоставления ее архитектурных элементов, не предпринималось. Результаты проведенных в XX веке археологических исследований у подножия Башни Сююмбике в Казанском Кремле противоречивы и не дают ответа на вопрос о точной датировке строительства башни; до настоящего времени не осуществлен детальный анализ строительных материалов башни с помощью современных естественнонаучных методов, что следовало бы сделать в ходе планируемой реставрации.

Цель исследования заключается в определении стилистических особенностей Башни Сююмбике, позволяющих выдвинуть научно обоснованную гипотезу о периоде ее строительства. В задачи исследования входит выявление архитектурных элементов Башни Сююмбике; поиск аналогичных архитектурных элементов в объектах европейского и восточно-мусульманского средневековья, определение композиционно-стилевой принадлежности Башни Сююмбике.

Гипотеза исследования призвана укрепить предыдущие исследования автора о вероятности проектирования и строительства Башни Сююмбике как типа ступенчато-ярусной проездной башни нефортификационного гражданского-культового назначения,озвезденной в период Казанского ханства (середина XV-первая половина XVI вв.), имеющей типологическое сходство с надвратными многоугольно-ярусными минаретами Египта, Туниса, Алжира, Марокко, Кордовы, Дамаска. Предполагается выявить и в стилистике башни Сююмбике архитектурные элементы, находящиеся в контексте стилевых систем средневековья<sup>1</sup>.

## 2. Материалы и методы

Объект исследования рассматривается как тектоническая структура, совокупность композиционно связанных архитектурных элементов, представляющих стилистические закономерности, характерные для того исторического периода, в контексте которого она возникла.

Источниками исследования явились историко-теоретические материалы, фотофиксации натурных исследований фасадных и интерьерных архитектурных элементов Башни Сююмбике, проведенных автором в 2018 и 2022 годах, обмерные чертежи, выполненные проф. М.М. Синявером (1944 г.), а также интернет источники: фотографии архитектурных памятников европейского и восточно-мусульманского средневековья, находящиеся в свободном доступе. Методы исследования включают: натурный, историко-архитектурный, литературный, структурно-тектонический, композиционно-стилистический, сопоставительно-табличный.

Метод архитектурно-стилистического анализа Башни Сююмбике основан на выявлении и сопоставлении ее архитектурных элементов с архитектурными элементами европейского и восточно-мусульманского средневековья. По итогам натурного исследования Башни Сююмбике выявлены и системно описаны в виде таблиц 1 и 2 двадцать три ее архитектурных элемента. На основе интернет-источников по фотофиксациям, находящимся в свободном доступе, проведен анализ архитектурных

<sup>1</sup> Айдарова Г. Н., Куприянов В.Н., Мирсаяпов Илизар Т. Башня Сююмбике в контексте архитектурной типологии восточно-мусульманских и булгаро-татарских башен и башенных минаретов // Известия КГАСУ 2023 №1(63), с. 159-175 [Aidarova G.N., Kupriyanov V.N., Ilizar T. Mirsayapov // News KSUAE 2023 №1(63), pp. 159-175]

объектов европейского (XI-XVI вв.) и восточно-мусульманского (VIII-XVI вв.) средневековья, выявлено в сумме 106 аналогичных архитектурных элементов.



Рис. 1. Средневековые европейские и восточно-мусульманские аналоги архитектурной структуры Башни Сююмбике: а). Собор в Модене - колокольня Гирландина, XIV в., Италия (Источник: <https://clck.ru/3BPDyn>); б) Церковь Сен-Нектари, Пюи-де-Дом, XII в., Франция (Источник: <https://clck.ru/3BPE4T>); в) Башня замка Ф.Сфорца, XV в. Милан (Италия); (Источник: <https://inlnk.ru/LAzQBe>); г) Башня Сююмбике в Казанском Кремле, конец XV-первая половина XVI вв., Татарстан (Россия) (Источник: <https://clck.ru/3BPEDz>); д) Минарет комплекса султана аль-Колауна, Каир XIII в., Египет (Источник: <https://t.ly/58T0d>); е) Минарет Исы Омейядской мечети, Дамаск, XIV в. (Сирия) (Источник: <https://clck.ru/3BPEgb>); ж) Минарет медресе ас-Салиха Айюба, Каир, XIII в. (Египет) (Источник: <https://clck.ru/3BPEhf>).

Fig. 1. Medieval European and Eastern Muslim analogues of the architectural structure of the Syuyumbike Tower: a). Cathedral in Modena, Ghirlandina Bell Tower, XIV century, Italy (Source: <https://clck.ru/3BPDyn>); b) Church of Saint-Nectaire, Puy de Dôme, XII century, France (Source: <https://clck.ru/3BPE4T>); c) Tower of the Castello Sforzetti Castle, Milan (Italy);(Source: <https://inlnk.ru/LAzQBe>); d) Syuyumbike Tower in the Kazan Kremlin, XVI century, Tatarstan (Russia) (Source: <https://clck.ru/3BPEDz>);  
e) Minaret of Sultan al-Colawun complex, Cairo XIII century, Egypt (Source: <https://t.ly/58T0d>); f) The Minaret of 'Isa of the Umayyad Mosque, Damascus, XIV. (Syria) (Source: <https://clck.ru/3BPEgb>); g) Minaret of As-Salih Ayyub Madrasah, Cairo, XIII century. (Egypt) (Source: <https://clck.ru/3BPEhf>).

Составлена сводная таблица архитектурных элементов Башни Сююмбике, в сопоставлении с архитектурными элементами северо-итальянской, французской, германской, центрально-азиатской, сельджукской, османской, североафриканской (мамлюкской) золотоордынской и др. архитектурных школ. Метод пропорционального анализа применен для уточнения композиционно-стилистической принадлежности Башни Сююмбике.

Таблица 1  
Классификация архитектурных элементов Башни Сююмбике и аналогов в европейской средневековой архитектуре

Архитектурные элементы Башни Сююмбике	Аналоги архитектурных элементов романской, готической и ренессансной архитектуры Северной Италии, Франции, Германии, Испании
1. Все элементы архитектурных деталей и декора сделаны из красного кирпича-простого кладочного и лекального	Замок Кастелло Сфорцетти, Милан, XV в. Италия; Кафедральный соб. во имя Успения Девы Марии, Падуя, XII в., Италия; Церкь Церковь Сен Нектари, Франция XII в. Санта-Мария-де-ла-Энкарнасьон, Константина, XV вв., Испания

## Продолжение таблицы 1

2. Многоярусные уменьшающиеся вверх четверики, восьмерики	Замок К. Сфорцетти, Милан, XV вв., Италия; Абб-во Кьяравалле: церк. Санта-Мария-ди-Ровениано, XII в., Милан, Италия; Собор Вознесения Девы Марии в Кремоне, XII в., Италия; Церк. Санта-Мария-де-ла-Энкарнасьон, г. Константина, XVI в., Испания
3. Цилиндричный свод нижнего яруса	Замок К. Сфорцетти, Милан, XV вв. Италия; Надвратная башня Бургтон, Любек, XIII в., Германия; Арка базилики Святого Амвросия, Милан XII в., Италия
4. Архивольт проездной арки цилиндричного свода перспективно заглублен вглубь свода	Кафедр. соб. Сан Франческа в Римине, XVв., Италия; Церк. Сан Мартин Турского во Фромисте, XI в., Франция Соб. в Шпайере, XI в., Германия; Соб. сен Мадлен в Везле, XI в., Франция
5. Пристенные колонны, не имеющие энтазиса.	Церк. Сен-Нектер Оверн, Орсиваль, XII в. Франция; Церковь Сен Нектер, Франция XII в; Церк. Св.Лаврентия, Мантуя, XII вв., Италия;
6. Валики на колоннах	Церк. св.Лаврентия, Мантуя, XII вв., Италия
7. Сталактиты (мукарны)	Не выявлено
8. Пьедесталы колонн	Базилика Санта Мария Новелла, Флоренция, XV в., Италия; Церковь Сен Нектер, XII в. Франция
9. Внутри четверика третьего яруса сделан сужающийся кверху четырехлотковый сомкнутый свод	Не выявлено, кроме наружных куполов с двойной оболочкой не ранее XV в.: (купол Санта Мария дель Фьоре, арх. Ф. Брунеллески)
10. Квадратные нишки парапета нижнего яруса, образованные редко поставленными столбиками и вставленными в нишках между ними рамками	Церк. Санта-Мария-дelle-Грация, Милан, XV в., Италия; Соб. Св. Марии, г. Лаах, Лаахское аббатство, XI в., Германия
11. Парапет второго и третьего ярусов оформлены узкими часто поставленными столбиками и узкими нишами между ними	Не выявлено
12. Кирпичные пояски на 1,2,3 ярусах в виде кирпичных уголков	Башня Св. Мартина в Тэрзуэле, XIV в, Испания
13. Многослойные подкарнизные пояски на четвертом-седьмом ярусах	Не выявлено
14. Раскреповка углов второго яруса	Не выявлено
15. Круглые проемы в стенах	Церк. Сан Франческа в Римини, XVв., Италия; Церк. Сан-Лоренцо, Флоренция, XVв., Италия
16. Оконные проемы коробовой формы	Не выявлено
17. Глухие окна второго и третьего ярусов	Аббатство Св. Троицы в Лессе, XI в., Франция
18. Ребра на гранях усеченного шатра (шестой ярус)	Кафедр. соб. Св. Марии в Шпайере, XI в., Германия; Кафедр. соб. Св. Мартина Турского и Святого Стефана, Майнц, XV вв., Германия.
19. Четверики и восьмерики укреплены угловыми лопатками	Кафедр. соб. Успения Девы Марии: кол-ня Гирландина, Мадена, XIVвв., Италия; Соб. Св. Марии, г. Лаах, XI в., Германия; Церк. Сан-Лоренцо Маджоре, Милан, XII в., Италия
20. Восьмерик седьмого яруса прорезан узкими арочными проемами	Соб. Св. Мартина, Майнц, XIII в., Германия; Церк. Сан-Лоренцо Маджоре, Милан, XV в., Италия; Церковь Сен Нектер, XII в., Франция
21. Оконные и подоконные и стенные нишки	Церк. Санта - Мария - Делле – Грация, Милан, XV в., Италия

Окончание таблицы 1

22. Усеченный восьмигранный шатер	Кафедр. соб. Успения Девы Марии: колок.-ня Гирландина, XIVвв., Модена, Италия
23. Шатровая крыша (шпиль) на восьмерике	Соб. Нотр Дам, Париж, XII в. Франция; Колок. Гирландина, Модена, XIVв., Италия; Амьенский соб. XIII в., Франция; Реймский собор, XIV в., Франция; Церк .Сен Нектер, XII в.,Франция; Аббатство Клюни, XII в., Франция

Таблица 2

**Классификация архитектурных элементов Башни Сююмбике и их аналогов в архитектуре мусульманского Востока. Датировка объектов соответствует Григорианскому календарю**

Архитектурные элементы Башни Сююмбике	Архитектурные элементы мусульманского средневековья: Иран (Хоросан), Золотая Орда, Турция (Сельджукская империя), Египет, Сирия и др.
1. Все структурные элементы Башни Сююмбике и архитектурные элементы сделаны из красного кирпича.	Мин-т меч. Абу-Дулаф, Самарра, IX в., Ирак; Мин-т Меч. Ибн Тулун, Каир, IX в., Египет; Башня Кабуса, XIII в., Иран; Мин-т аль-Колауна, Каир XIII в., Египет
2. Многоярусные уменьшающиеся вверх четверики, восьмерики	Черная палата, Болгар, XIV в., Золотая Орда; Мин-т меч. Омейядов, Дамаск, XV вв., Сирия; Мин-т меч. Укба, Кайруан, VII в., Тунис; Мин.-т комплекса султана аль-Мансура Калауна, XIII в., Каир; Мин-т медресе ас-Салиха Айюба, XIII в., Каир; Святилище Али Акбара Арадана, Иран, XIII в.; Джабалия, Керман, X в., Иран; Мин-т. меч. Джаме г. Наин, XIII в. Иран; Меч. Эски-сарай, XIV в., Крымский улус Золотой Орды; Дюрбе Ахмедбэя, Крым. х-во, в.
3. Цилиндричный свод нижнего яруса	Мин. Кордовской мечети, VIII-XIII вв., Кордов. халифат; мин. Баб Шарки, Дамаск XIIIвв., Сирия; Мин-т меч. Ибн-Тулун, Каир, IX в., Египет; Мин-т медресе ас-Салиха Айюба, Каир, XIII в.
4. Архивольт проездной арки цилиндричного свода перспективно заглублен вглубь свода.	Мин-т Баб-Шарки, Дамаск, XIII в., Сирия; Мавз. Тура-хана, Чишма, XIV в., Золотая Орда (Башкортостан)
5. Пристенные колонны, не имеющие энтазиса	Меч. Магоки Аттари, Бухара, XIII в.; Меч. Узбека, XIII в., Золотая Орда; Харраганские башни, Харраган, XIII в., Иран; Меч. Улуджами в Дивриги, XIII в., Турция (Сельджукс. имп.).
6. Валики на колоннах	Меч. Магоки Аттари, Бухара, XIII в.; Мавзолей Айша-Биби, XIII в. г. Тараз, XIII в., Казахстан
7. Сталактиты (мукарны)	Меч. Магоки Аттари, Бухара, XIII в.; меч. Улуджами в Дивриги, XIII в., Турция (Сельджукс. имп.);Крепость Мардакян, Баку, XIV в., Золотая Орда
8. Пьедесталы колонн	Меч. Куббат ас-Сахра «Купол Скалы», VII в., Иерусалим; меч. Омейядов, Дамаск, VIII в. Сирия; дв-ц османских султанов в Эдирне, XV в; дв-ц Топкапы в Стамбуле (XV-XVI вв.)
9. Внутри четверики третьего яруса сделан сужающийся кверху четырехлотковый сомкнутый свод	Внутренний свод в четвериках мавзолеев Маджара: Айши-Биби, XIII; Бабаджи-Хатун, XIIIв., Жамбылская обл., Казахстан

## Окончание таблицы 2

10. Квадратные нишки парапета нижнего яруса, образованные редко поставленными столбиками и вставленными в нишках между ними рамками	Меч.Ибн-Тулун, IX в., Каир, Египет; Мин-т Зеленой меч., Бурса, XV в., Турция; Мин-т Джума меч., Евпатория, XVI в., Крымск. ханство; меч. Джаме г.Наин, XIII в., Иран
11. Парапет второго и третьего ярусов оформлены узкими часто поставленными столбиками и узкими нишками между ними	Малый мин., Болгар, XIV вв., Золотая Орда
12.Пояски 1-,3 ярусов из кирпичных уголков	Бывшая меч. Кристо дела Лус, Толедо, X., Корд. халифат; Мавз. Бабаджа-хатун, Тараз, XIII в., Жамбылская обл., Казахстан
13. Многослойные подкарнизные пояски на четвертом-седьмом ярусах	Дворец Тамерлана, Шахрисабз XIV, Золотая Орда; Джума Меч., Анапа, XVI в., Крымск. хво; Мавз. Айша-Биби, XIII в., Жамбылская обл. Казахстан
14. Раскреповка углов второго яруса	Мавз. Джакхангира, Шахрисабз, XIV в., Хорезм, Золотая Орда; Меч. Джайме в г. Голпаеган, XIII в., Иран
15. Круглые проемы в стенах	Меч. султана Хасана, Каир, XIV в., Египет; Мин. меч. Султ. аль-Колауна, XIII в., Каир; Свят.-ще Али Акбара Арадана, XIII в., Иран; Меч. Эски-сарай, XIV в., Крымск.улус Зол. Орды
16. Оконные и др. проемы коробовой формы	Меч.хана Узбека, Солхат, XIV в., крымский улус Золотой Орды
17. Глухие окна второго и третьего ярусов	Мин. меч. Ибн Тулун, IX в. Египет; Мавз. Иль-Арслана, Кунёргенч, XIII в., Хорезм
18. Ребра на углах усеченного шатра шестого яруса	Улу-Джами в г. Дивриги, XIIIв., Сельдж. имп. (Турция); Пятничная меч. в г. Натанз, XIV в., Иран
19. Четверики и восьмерики укреплены угловыми лопатками	Мавзолей Теймури, г. Ширван, Иран, IX вв.; Гробница Саллара в Тебризе, Иран,XIII в.
20. Восьмерик седьмого яруса прорезан арочными проемами с	Не выявлены
21. Оконные, подоконные и стенные нишки	Узгенский мин-т, Узген, XIII в. Мавераннахр (Кыргыстан); Мин-т комплекса султана аль-Колауна, Каир XIII в., Египет; Мин-т медресе ас-Салиха Айюба, XIII в., Каир; Гробница Саллара в Тебризе, XIII в. Иран; Свят.-ще Али Акбара Арадана, XIII в., Иран; Джабалия, Керман, X в., Иран.
22. Усеченный восьмигранный шатер	Не выявлен
23. Шатровая крыша (шпиль) на восьмерике	Мин-т меч. Ала ад-Дина, Конья, XIII в., (Сельджукс.имп.); Мин-т Исы меч. Омейядов, Дамаск, XIV в., Сирия; Мин-т меч. Хан-Джами, Бахчисарай, XVI в., Крымское ханство; Дворец Топкапы- башни на главных воротах, XV-XVI вв., Османск. Имп. (Турция)

**3. Результаты и обсуждение**

Башня Сююмбике –краснокирпичная, семиярусная, высотой 58 метров, состоит из последовательно уменьшающихся, стремительно восходящих многоугольных ярусов геометрической формы. Три нижних четверика и четыре верхних восьмерика увенчаны изящным ребристым шатровым шпилем. По трем нижним ярусам сделаны открытые узкие обходные террасы, по всем ярусам расположено разное количество оконных

проемов коробовой формы, на восьмериках пятого и седьмого ярусов оконные проемы арочной формы, круглые вентиляционные проемы сделаны на двух нижних четвериках и на четырех гранях шестого восьмигранного яруса. Декоративное оформление башни сделано из простого и лекального кирпича в виде поясков и нишек разной конфигурации.

Нижний ярус образован проездной аркой, объединяющей северный и южный пилоны; цилиндрический свод арки дополнительно укреплен подпружной аркой. Над аркой не предусмотрена характерная для русской архитектуры иконная ниша. По сторонам арочного проезда установлено по две пристенные колонны, не имеющие антаблемента, энтазиса, оформленные капителями в виде сталактитообразных выступов. Архиволт имеет перспективное углубление внутрь свода, пяты его опираются на импости. В интерьере второго яруса на южной и северной стенах расположено по одной крупной, глубокой нише. Внутри четверика третьего яруса сделан сужающийся кверху четырехлотковый сомкнутый свод, покрытый поверх дощатым настилом; углы четверика изнутри заложены кирпичной кладкой. Вход с северной стороны башни ведет с первого до седьмого яруса в направлении против часовой стрелки: сначала по узкой внутристенной кирпичной лестнице попадаем на 3 ярус, затем по деревянной - на седьмой. С южного фасада вход ведет на внутристенную лестницу южного пилона, направленную по часовой стрелке до 3 яруса. В башне 183 ступени.

Под «архитектурными элементами» в работе понимаются структурно-тектонические, композиционные и декоративные элементы.

Термин «восточно-мусульманская архитектура» в контексте данной статьи использован для обозначения понятий «ближневосточная», «центральноазиатская» мусульманская архитектура в отличии от европейской мусульманской архитектуры.

В архитектуре Башни Сююмбике выявлено и зафиксировано 23 стилевых элемента, по которым найдено 106 аналогов из объектов преимущественно культовой архитектуры европейского и восточно-мусульманского средневековья. Из 41 выявленного архитектурного элемента европейского средневековья аналогичного архитектурным элементам Башни Сююмбике оказалось: из Северной Италии -19 арх. эл. (XIII-XV вв.); Франции - 12 арх. эл. (XIII-XIII вв.); Германии- 7 арх. эл. (XIII-XV вв.); Испании - 3 арх. эл. (XV-XVI вв.).

Из 65 выявленных архитектурных элементов восточно-мусульманского средневековья аналогичных оказалось: в Иране сельджукского периода -14 арх. эл. (XIII-XIII вв.); Египете -12 арх. эл. (IX-XIV вв.); Золотой Орде, включая Золотоордынскую Булгарию-10 арх. эл. (XIII-XIV вв.); Центральной Азии, сельджукского периода- 8 арх. эл. (XIII-XIII вв.); Конийском султанате (Сельджукский Рум) и Османской имп. - 8 арх. эл. (XIII-XVI вв.), Сирии - 5 арх. эл. (VIII-XV вв.), Крымском ханстве – 5 арх. эл. (XIV-XVI вв.); Ирак -1 арх. эл. (IX в.); Иерусалим-1 арх. эл. (VII в.); Тунис-1 арх. эл. (VII в.).

Выявлены архитектурные элементы романского, готического романско-мудехарского стилей, аналогичные архитектурным элементам Башни Сююмбике. К ним относятся: краснокирпичные стены, башенные ярусно-многоугольные структуры (четверики, восьмерики), пристенные колонны, цилиндрические своды, подпружные арки, перспективно заглубленные архиволты; арочные проемы, шатрово-ребристые крыши, шатровые шпили и др.; к готической стилевой системе относится пропорционирование методом подобия треугольников (триангуляция), а также резкая устремленность вертикальной композиции объектов в высоту.

К выявленным архитектурным элементам омейядского, аббасидского, сельджукского, мамлюнского, османского и др. стилей аналогичным архитектурным элементам Башни Сююмбике, следует отнести: кирпичные конструкции, строгую геометрию объемов, многоугольно-ярусносные структуры (четверики, восьмерики), пристенные колонны, шатровость, внутриярусные купола, ниши в интерьере, фасадные нишки, многослойные пояски, мукарны, шатровые покрытия и др.

Сельджукская архитектура была распространена в XIII-XIII вв. в Центральной и Малой Азии и транслировалась позже в XIV-XVI вв. на архитектуру Османской империи (Мавзолей Хайр-ед-Дина Барбароссы, XVI в., арх. К. Синан) и большую часть исламского мира, в том числе на Волжскую Булгарию золотоордынского периода (Восточный мавзолей, Черная палата и др., XIII-XIV вв.). Аналоги архитектурных

элементов Башни Сююмбике включают не только собственно период Сельджукской империи, но и более ранние, начиная с VIII-X вв., когда формировались традиции арабо-мусульманского средневековья, которые вошли позднее в сельджукскую, а затем золотоордынскую, крымскую, османскую архитектуры. Общность элементов можно объяснить не только торговыми, религиозными и культурными связями, но и общностью традиций суннитского Арабского халифата, вхождением в ареал влияний мамлюкского Египта, Сельджукской империи, Золотой Орды.) [21]. Аналогично происходило и с романским стилем, воспринявшим традиции Рима и Византии, влияния Востока и транслировавшим их в период развития готической архитектуры.

По итогам сопоставительного анализа необходимо остановится на некоторых наиболее характерных впервые выявленных стилистическим анализом архитектурных элементах Башни Сююмбике.

1) Ближайшими европейскими и восточно-мусульманскими аналогами по сумме архитектурных элементов являются:

- а) Колокольня Гирландина собора в Модене, XIV в., Италия;
- б) Церковь Сен-Нектер, Пюи-де-Дом, XIII в., Франция;
- в) Башня замка Ф. Сфорца, XV в. Милан, Италия;
- г) Минaret комплекса султана аль-Колауна, Каир XIII в., Египет;
- д) Минaret Исы Омейядской мечети, Дамаск, XIV в., Сирия;
- ж) Минaret медресе ас-Салиха Айюба, Каир, XIII в., Египет (Рис.1).

2) В Башне Сююмбике пристенные колонны имеют характерные для романских и готических колонн цилиндрическую форму без энтазиса, базы колонн отличаются от романских и от классицистических. Пята архивольта арки опирается на импост, что характерно для романского стиля. Аналоги постаментов колонн найдены в архитектуре исламского средневековья (мечеть Омейядов в Дамаске, VIII в.), а также в раннеосманской архитектуре (Дворец султанов в Эдирне (XV в.) и дворец султанов Топкапы в Стамбуле , XV- XVI вв.)

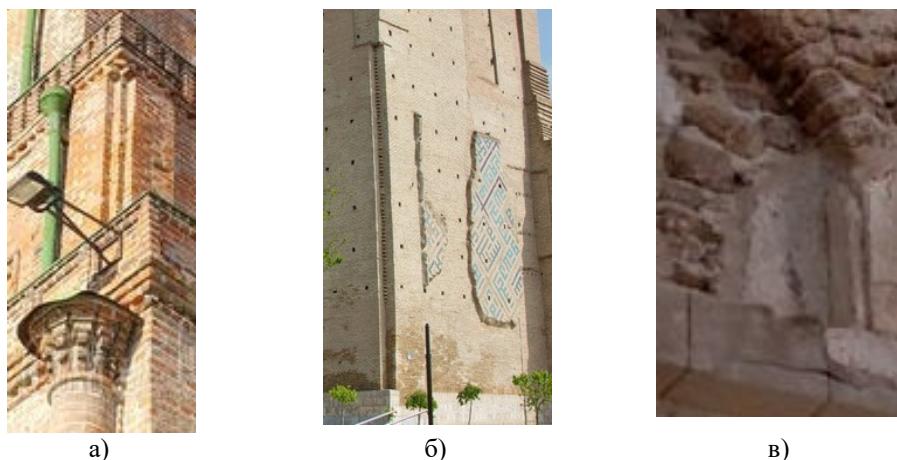


Рис. 2. Аналоги декоративной раскреповки угла Башни Сююмбике (слева направо):

а) Раскреповка угла второго яруса Башни Сююмбике с декоративной обработкой (фото Г. Айдаровой); б) Раскреповка угла-деталь фасада мавзолея Джаконгира и Омара в Шахрасабзсе, Золотая Орда, XIVв.( Источник: <https://clck.ru/3BPFA8>); в) Раскреповка угла оконной ниши восьмерика внутри Черной палаты, XIV в., Болгар ( Источник: <https://clck.ru/3BPFCN>)

Fig. 2. Analogues of the decorative wall projection of the corner of the Syuyumbike Tower (from left to right): a) The wall projection of the corner of the second tier of the Syuyumbike Tower with decorative treatment (photo by G. Aidarova); b) The wall projection of the corner-detail of the façade of the mausoleum of Jahongir and Omar in Shahrabsabz, Golden Horde, XIV. (Source: <https://clck.ru/3BPFA8>);

c) The wall projection of the corner of the octagon window niche inside the Black Chamber, XIV, Bolgar (Source: <https://clck.ru/3BPFCN>)

3) Натурное исследование показало, что внутри четверика второго яруса на южной и северной стенах сделано по одной глубокой ниши; аналогичные ниши есть на одной из стен в интерьере Черной палаты в Болгаре, XIV в.

4) Внутри четверика третьего яруса сделан сужающийся кверху четырехлотковый сомкнутый свод, поверх которого уложен дощатый настил перекрытия. Аналоги выявлены в архитектуре сельджукских мавзолеев XIII века: внутренние своды в четвериках мавзолеев Маджара: Айши-Биби и Бабаджи-Хатун, Жамбылская обл., Казахстан.

5) Раскреповка углов второго яруса Башни Сююмбике – декоративный прием, который встречается в архитектуре мусульманского средневековья: мавзолей Джаконгира и Омара в Шахрасабзее, Золотая Орда, XIV в.; Черная палата, Болгар, XIV в, Татарстан (срез угла в нише оконного проема восьмерика в интерьере)(Рис.2). Аналогичен и угловой срез входного портала в Альгамбру, XV в. Испания;

6) Аналогом кирпичных сводов в оконных проемах коробовой формы в Башне Сююмбике является кирпичный свод глухого проема в цокольной части руинированного «дома феодала» (баня), Биляр, X в., Волжская Булгария.

7) Шатровый шпиль башни Сююмбике имеет множество аналогов в архитектуре готических соборов (Нотр –Дам, XIII в., Париж), а также в аналогах мусульманского Востока (шпиль Минарета Исы Омейядской мечети, Дамаск, XIV в.).

8) С южного входа нижнего яруса сделанная в толще стены кирпичная лестница направлена по часовой стрелке, доходя только до 3 яруса. Основная же лестница сделана в толще пилона с северной стороны нижнего яруса в направлении против часовой стрелки, ведущая на 3 ярус, затем выше на седьмой уже по деревянной лестнице также в направлении против часовой стрелки. Против движения солнца сделаны лестницы в станичных минаретах: минарет Малвия в Самарре, IX в., Ирак; Малый и Большой минареты в Болгаре, XIV в, Золотая Орда и многие другие).

9) Поясок парапета нижнего яруса, состоящий из столбиков и вставленных между ними рамочек, имеет некоторое сходство с декоративными ширинками в архитектуре русского узорочья, но отличается деталями исполнения, а также декором (нишки рамочек не украшены выпуклым узором).

10) Над проездной аркой не предусмотрена характерная для русской архитектуры иконная ниша, при этом общим правилом является размещение иконных ниш над арочными проездами в башнях Московского Кремля: Спасской, Боровицкой, Кутафьей, Мостовой башни в Измайлово и др. Иконные ниши или надвратные церкви характерны для башен Казанского кремля (Спасской, Никольской, Воскресенской); неизвестны и случаи установки временной иконы (подобно таковой как над южным въездом в Казанский кремль у Спасской башни до 1917 г) или церковного освящения Башни Сююмбике.

11) Стилистическая и тектоническая основа Башни Сююмбике наглядно проявилась в ее пропорциональном строении. На основе архитектурного обмерного чертежа Башни Сююмбике, выполненного проф. Синявером М.М. в 1944 году, автором выполнен графический анализ ее пропорционального строя (Рис.3а). Установлены закономерности, связанные с методом пропорционирования, который использовался в готической архитектуре. Аналогом является Миланский собор Рождества Девы Марии (Рис.3 б), композиция и тектоника которого основаны на методе триангуляции - геометрическом подобии равнобедренных треугольников. Для средневекового архитектора триангуляция была не столько идеальной нормой пропорции, сколько техническим средством проектирования зданий. Будучи геометрами, они создали графический способ выражать соотношение масс. Этот прием применялся в XVI веке и Леонардо да Винчи [22].

Установлено, что Башня Сююмбике по стileобразующим характеристикам находится в диапазоне европейских стилей (романский, готика, мудехар -XIII-XVI вв.) и восточно-мусульманских стилей (омейядский, аббасидский, сельджукский, мамлюкский, османский - VIII-XVI вв.). Следовательно, не относится к русско-европейским стилям XVII – начала XVIII вв. (кирпичное узорочье, барокко). Ведущим стилем в русской архитектуре второй половины XVI - первой половины XVII вв. было «русское узорочье» (Троицкая церковь в Никитниках, Москва, 1628-1651). Характерные стилевые признаки и

архитектурные элементы включают богатый декор фасадов: шатры со слуховыми окнами, кокошники, пилasters, колонки, гирьки, сандрики, зубчики (сухарики), городки, наличники, обилие белокаменного декора на фоне краснокирпичных стен. Подобных стилевых элементов нет в Башне Сююмбике.

Если сравнивать архитектурные элементы Башни Сююмбике с аналогами в русской архитектуре рубежа XVII – XVIII веков, то и здесь нет совпадений, т. к. с 1690 годов отмечается развитие московского (нарышкинского) барокко (Покровская церковь в Филях, Москва, 1690-1694). Появляются открытые лестницы, балюстрады, закругленные углы, пилasters, фризы, аттики, богато декорированные наличники, слуховые окна, фронтоны, усложненные купола, полихромная окраска оштукатуренных стен. Важными аналогами при этом являются двухъярусные церкви и многоярусные колокольни с использованием четвериков и восьмериков. Ярусные структуры типа восьмерик на четверике возникают в русской церковной архитектуре не без влияния Волжской Булгарии, где формы «восьмерик на четверике» появляются раньше, чем в московском зодчестве (Восточный мавзолей и Черная палата в Болгаре, XIV в.). Так, С. В. Заграевским отмечено, что в Волжской Булгарии шатровые восьмигранные покрытия появляются раньше, чем в русской архитектуре [23].

Если бы Башня Сююмбике, относящаяся к гражданской архитектуре, была построена в XVII-начале XVIII вв., то должна была бы иметь какие-либо признаки узорочья или барокко, так как даже в фортификационной Боровицкой башне Московского кремля, надстроенной четырьмя верхними ярусами в 1680-90-х гг. присутствуют признаки барокко (кокошники, слуховые окна, наличники, сдвоенные колонки, белокаменный декор). Очевидна разница в стилевых элементах, которые по сравнению со стилевыми элементами Башни Сююмбике относятся к более поздней стилевой эпохе. В архитектуре башни Сююмбике отдельные элементы (многослойные пояски, сталактиты, угловая раскреповка, внутренняя лестница, направленная против часовой стрелки, внутриярусный четырехлотковый сомкнутый купол не имеют аналогов в русской архитектуре.

Проведенное исследование дает основание утверждать, что в стилистике башни Сююмбике преобладают архитектурные элементы аналогичные романскому стилю с некоторыми включениями композиционных приемов готики (триангуляция, шатровый шпиль, динамичность композиции), а также сельджукскому, мамлюкскому, османскому стилям и не содержатся стилевые признаки кирпичного узорочья XVII века и барокко рубежа XVII-XVIII вв., что является допущением вероятности ее проектирования и строительства в конце XV- первой половине XVI вв. Высокая степень выразительности и композиционного совершенства тектонической структуры Башни Сююмбике говорят в пользу строительного периода, выходящего из позднего средневековья на новый этап архитектурного развития. Символика образа оригинальна, стремительная динамика восходящих семи ярусов указывает на уверенное владение технологиями высотного строительства из обожженного кирпича.

Башню Сююмбике проектировал выдающийся мастер, владеющий композиционно-стилистическими приемами итальянской школы. Известно, что поблизости от Казанского ханства за период несколько более полувека не менее десяти итальянских архитекторов участвовали в строительстве Москвы, Нижнего Новгорода, Пскова, Коломны и некоторых малых городов. В Москве работали восемь итальянских зодчих, обладавших большими познаниями и практикой в строительстве кирпичных зданий и сооружений [24]. Известно, что в итальянских колониях Крыма в эпоху Золотой Орды работали генуэзские и венецианские архитекторы (Генуэзская крепость, XIV в., Судак). Династические и культурные связи с Крымским ханством были более, чем активны.

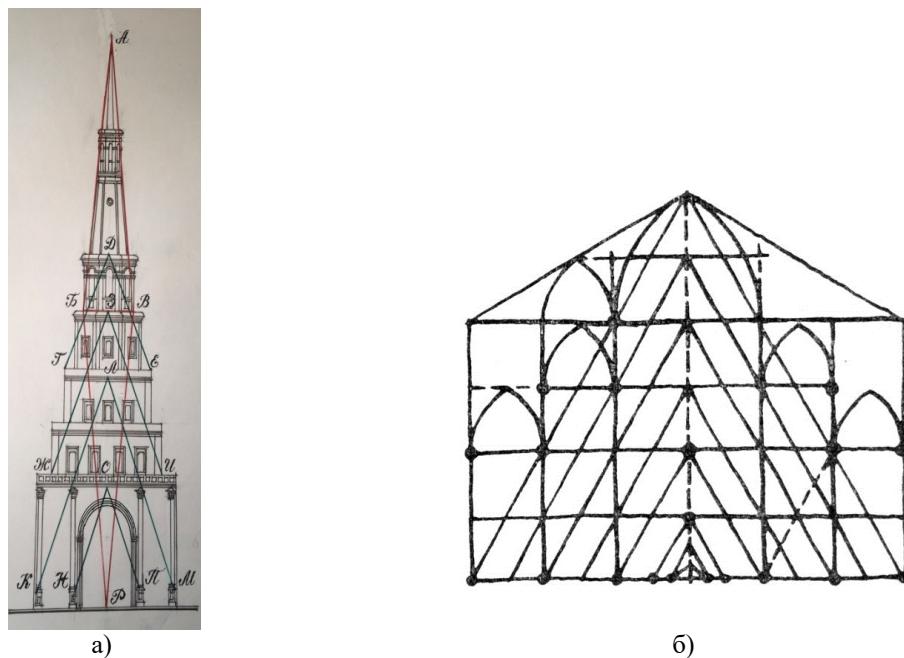


Рис. 3. а) пропорциональный анализ Башни Сююмбике, выполнен Айдаровой Г.Н. на основе обмерочного чертежа Синявера М.М.(1944г) выявлена готическая система пропорционирования (метод триангуляции): треугольник БАВ подобен и равен треугольнику БВР; нижерасположенные четыре треугольника также имеют подобия; б) Аналог - чертеж Габриэле Сторналоко (1388г.): разрез Миланского каф. Соб. Рождества Пресвятой Девы (1386-1572гг): тектоника на основе метода триангуляция (подобия треугольников) [22].

Fig. 3. a) proportional analysis of the Syuyumbike Tower, performed by G.N. Aidarova on the basis of the measuring drawing by M.M. Sinyaver (1944) the Gothic system of proportioning (triangulation method) was revealed: the triangle BAS is similar to and equal to the triangle BVR; The four triangles below also have similarities; b) Analogue – a drawing by Gabriele Stornalico (1388): a section of the Milan Cathedral of the Nativity of the Blessed Virgin Mary (1386-1572): tectonics based on the method of triangulation (similarity of triangles) [22].

Из Крымского ханства, где сильны были традиции Закавказья (Армения), оплодотворенные сельджукскими традициями [25], влияния легко достигали Казани, где была Армянская слобода, как и в золотоордынском Болгаре, известная своими мастерами, которые также могли участвовать в строительстве архитектурных объектов столицы Казанского ханства. Сельджукская архитектура находилась под влиянием армянской архитектуры благодаря использованию мусульманских архитекторов, происходящих из исторической Армении, а также благодаря влияниям архитектуры Ирана, Сирии, Ирака и Центральной Азии [26], булгаро-татарские связи с некоторыми из которых, были традиционно прочными, начиная с X века. При этом важным методологическим тезисом является утверждение О. Шуази о том, что ни одна архитектурная школа не остается вне влияния других школ, окружающих ее, что преобладающим было влияние Востока на формирование романского стиля [27], а если архитектурные формы существуют продолжительное время и входят в обычай, традицию, то приобретают свойства «положительного закона» и стилистического канона [28].

Предположение о том, что Башню Сююмбике могли проектировать и строить казанские зодчие базируется на том, что булгаро-татарская архитектурная школа была уже вполне сложившейся в эпоху Золотой Орды. Технические приемы, типологические признаки и элементы булгарской архитектуры: кирпичная кладка, известная там с X века, башенность, ярусность (четверики, восьмерики) шатровость - аналогичны структурным элементам Башни Сююмбике и говорят о том, что ее появление в архитектуре Казанского ханства было вполне подготовлено предыдущим развитием.

Возможность строительства Башни Сююмбике, в диапазоне конца XV- первой половине XVI вв., косвенно подтверждается тем, что в архитектуре русских

средневековых крепостей сохранились отдельные краснокирпичные башни XV–XVI веков: Нижегородский кремль (Часовая башня, XVI век), Коломенский кремль (Пятницкая надвратная башня, XV в.), Кремль Новгорода Великого (Митрополичья башня, XV в.). По своим стилистическим признакам Башня Сююмбике как объект гражданской архитектуры имеет более выраженные художественные качества даже в сравнении с некоторыми фортификационными московскими башнями. По мнению доктора искусствоведения С.М. Червонной Башня Сююмбике отличается от Боровицкой башни Московского Кремля «более изысканными пропорциями и безукоризненной законченностью архитектурных форм» [29].

Выдвинутый тезис требует дальнейших исследований. Остается надеяться, что будут еще найдены в библиотеках и архивах стран Востока чертежи Башни Сююмбике, как это произошло в Самарканде [30], где был установлен факт существования архитектурных проектов самаркандских архитекторов XV–XVI веков: обнаружены чертежи узбекского зодчего XVI века, что, не исключает такой возможности и в отношении Башни Сююмбике.

#### 4. Заключение

1. Башня Сююмбике по архитектурным элементам и стилеобразующим характеристикам находится в диапазоне европейских (преимущественно XIII – XVI вв.) и восточно-мусульманских (преимущественно VIII – XVI вв.) стилевых элементов средневекового периода.

2. Особенности архитектуры Башни Сююмбике заключаются в проявлении регионального стиля, свойственного для самостоятельной архитектурной школы, выразившегося в творческом осмыслинии романских, готических, сельджукских, мамлюкских, османских и др. архитектурно-композиционных элементов на основе архитектурных традиций булгаро-татарского средневековья.

3. Выдвинут научно обоснованный тезис о том, что Башня Сююмбике построена в период Казанского ханства в диапазоне конца XV- первой половине XVI вв. по проекту выдающегося зодчего, владевшего методами проектирования, свойственными для северо-итальянской школы (триангуляция) как объект гражданской архитектуры культового (минарет) и светского назначения. Дальнейшие исследования позволят внести уточнения в датировку архитектурного шедевра.

*Выражаю искреннюю признательность д.б.н. Фахруллину Равилю Фаридовичу за участие в натурном исследовании Башни Сююмбике, а также плодотворные дискуссии по вопросам ее атрибуции.*

#### Список литературы / References

1. Айдарова-Волкова Г. Н., Фахруллин Р. Ф., Ботерблум К. Историко-архитектурный анализ изображения Казани голландским мастером Корнелисом де Брейном // Вестник Санкт-Петербургского университета. История. 2020. Т. 65. Вып. 2. С. 566–583. [Aidarova-Volkova G. N., Fakhrullin R. F., Boterblum K. Historical and architectural analysis of the image of Kazan by the Dutch craftsman Cornelis de Bruyn// Bulletin of St. Petersburg University. Istoriya publishing house. 2020. V. 65. Issue. 2. P. 566– 583.] <https://doi.org/10.21638/11701/spbu02.2020.214>.
2. Шуази, О. История архитектуры. Т.2. М.: изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1937.694 с. [Choisy, Au. History of architecture. T.2 M.: Publishing House of the All-Union Academy of Architecture, 1937.-694 p.]
3. Diana Darke My House in Damascus: An Inside View of the Syrian Crisis (2015, Trade Paperback, New Edition)] -320 p. <https://clck.ru/3BPFRg>
4. Гордлевский В. А. Государство Сельджукидов Малой Азии. М.; Л.: Академия наук СССР, 1941. 200 с. [Gordlevsky V. A. The Seljukid State of Asia Minor. M.; L.: Academy of Sciences of the USSR, 1941. 200 p.]
5. Кононенко Е.И. Еще раз о «Проблеме сельджукского искусства» // Вестник СПбГУ. Сер. 15. 2015. Вып. 3. С.66-79 [Kononenko E. I. One more time about the "Problem of Seljuk Art". // Bulletin of SPbU. Ser. 15. 2015. Issue 3. P. 66-79]

6. Blair, Sheila S., Bloom Jonathan. The art and architecture of Islam 1250-1800 [Reprint with corrections]. New Haven: Yale University Press; London: Mapin Publishing Pvt. Ltd. 1995. 348 p.
7. Баталов А. Л. Особенности итальянанизмов в московском каменном зодчестве рубежа XVI-XVII вв. // Архитектурное наследство. Вып. 34. Преемственность и влияния в архитектуре народов СССР. М.: Стройиздат. 1986. С. 238-245. [Batalov A. L. Features of Italianisms in Moscow stone architecture at the turn of the XVI-XVII centuries. // Architectural heritage. Issue 34. Continuity and influences in the architecture of the peoples of the USSR. Moscow: Stroyizdat. 1986. P. 238-245.]
8. Земцов С. М. Архитекторы Москвы второй половины XV и первой половины XVI века/ Зодчие Москвы XV - XIX вв. М.: Московский рабочий, 1981. 133 с. [Zemtsov S. M. Architects of Moscow of the Second Half of the XV and the First Half of the XVI./Moscow of the XV - XIX.- M.: Moskovskiy Rabochiy. 1981. 133 p.]
9. Подъяпольский С.С. Деятельность итальянских мастеров на Руси и в других странах Европы в конце XV начале XVI века // Советское искусствознание. М., 1986. №20. [Podyapolsky S.S. The activity of Italian craftsmen in Russia and other European countries at the end of the XV - beginning of the XVI century // Soviet art studies. M., 1986. No.20.]
10. Надырова Х. Г. Средневековые города Татарстана: развитие градостроительной культуры Волго-Камья X - середины XVI вв. Казань: КГАСУ. 2014, 172 с. [Nadyrova H. G. Medieval cities of Tatarstan: the development of urban planning culture of the Volga-Kama region of X - middle of XVI centuries. Kazan: KSUAE. 2014, 172 p.]
11. Зиливинская Э.Д. Культовая архитектура Золотой Орды: происхождение и традиции // Поволжская археология №2(16).2016. С. 44-71 [Zilivinskaya E.D. Cult Architecture of the Golden Horde: Origin and Traditions // Volga Region Archaeology No. 2 (16).2016. P. 44-71]
12. Айдарова–Волкова Г.Н., Краснобаев И.В. Национально-региональные основы архитектуры Татарстана в трудах С.С. Айдарова. Казань: КГАСУ, 2014, 309 с. [Aidarova–Volkova G.N., Krasnobaev I.V. National and regional foundations of Tatarstan architecture in the works of S.S. Aidarov. Kazan: KSUAE, 2014, 309 p.]
13. Грабарь, И. История русского искусства. История архитектуры; Т. 2 Допетровская эпоха. М: издание И. Кнебель, 1910, 1913. 480с. [Grabar, I. History of Russian Art; History of Architecture; vol. 2 The Pre-Petrine Era M: I. Knebel Edition, 1910, 1913. 480 p.].
14. Айдаров С.С., Халиков А.Х., Юсупов Н.З. Память поколений. Казань: Татарское книжное издательство, 1990. 102с.- С.41. [Aidarov S.S., Khalikov A.Kh. Yusupov N.Z. Memory of generations / S.S. Aidarov. Kazan: Tatar book publishing house, 1990. 102 p. - P.41]
15. Халитов Н. Х. Башня Сююмбике в Казанском Кремле <http://art16.ru/suumbike> (дата обращения 3.03.2022; 12.15.). [Khalitov N. Kh. Syuyumbike Tower in the Kazan Kremlin. http://art16.ru/suumbike (Reference date: 03.03.2022; 12.15)]
16. Агишева И.Н., Куприянов В.Н., Агишева С.Т. Казань: путь длиною в тысячу лет. Казань: КГАСУ, 2017. 384 с. С.103-104 [Agisheva I.N., Kupriyanov V.N., Agisheva S.T. Kazan: the path of a thousand years. Kazan: KSUAE, 2017. 384 p. P. 103-104]
17. Синявер М.М., Борисов П.С., Тарасова В.А. Обмеры башни Сююмбеки/ Башня Сююмбеки (обмеры). Казань, 1944. С. 5-11. [Sinyaver M.M., Borisov P.S., Tarasova V.A. Measurements of the Syuyumbike tower / Tower of Syuyumbike (measurements). Kazan, 1944. P. 5-11.]
18. Трофимов А.А., Синявер М.М., Борисов П.С., Тарасова В.А. Пропорции башни Сююмбеки /Башня Сююмбеки(обмеры). Казань, 1944. С. 18-24. [Trofimov A.A., Sinyaver M.M., Borisov P.S., Tarasova V.A. Proportions of the Syuyumbike tower / Syuyumbike Tower (measurements). Kazan, 1944. P. 18-24.]
19. Щусев А.В., Синявер М.М., Борисов П.С., Тарасова В.А. Предисловие /Башня Сююмбеки(обмеры). Казань, 1944. С. 3. [Shchusev A.V., Sinyaver M.M., Borisov

- P.S., Tarasova V.A. Preface / Tower of Syuyumbike (measurements). Kazan, 1944. P. 3.]
20. Егерев В.В., Синявер М.М., Борисов П.С., Тарасова В.А. Сююмбекина башня (опыт историко-архитектурного анализа)/Башня Сююмбеки (обмеры). Казань, 1944. С. 11-18. [Egerev V.V., Sinyaver M.M., Borisov P.S., Tarasova V.A. Syuyumbike tower (experience of historical and architectural analysis)/Syuyumbike Tower (measurements). Kazan, 1944. P. 11-18.]
21. Ettinghausen R., Grabar O., Jenkins-Madina M. Islamic art and architecture, 650-1250. - New Haven ; London : Yale univ. press, cop. 2001. XIII, 344p. (Yale university press Pelican history of art)
22. Всеобщая история архитектуры. Том 4 : Архитектура Западной Европы. Средние века. Под редакцией: А. А. Губера (ответственный редактор), Н. Д. Колли, П. Н. Максимова, И. Л. Мáца, Ю. А. Нельговского, Г. А. Саркисиана. 1966. 694 с.: ил. С. 654, 658. [General history of architecture. Volume 4: Architecture of Western Europe. Middle Ages. Edited by: A. A. Guber (executive editor), N. D. Kolli, P. N. Maksimov, I. L. Mats, Y. A. Nelgovsky, G. A. Sarkisian. 1966. 694 p. with ill. P. 654, 658]
23. Заграевский С.В. Типологическое формирование и базовая классификация древнерусского церковного зодчества. Saarbrücken, 2015 [Zagraevsky S.V. Typological formation and basic classification of ancient Russian church architecture. Saarbrücken, 2015]
24. Земцов С.М. Архитекторы Москвы второй половины XV и первой половины XVI века // Зодчие Москвы XV – XIX вв. М., 1981. [Zemtsov S.M. Architects of Moscow of the second half of XV and the first half of XVI century // Architects of Moscow of XV – XIX centuries, Moscow, 1981.]
25. Казарян А. Ю. Стилистическое развитие армянской архитектуры в Крыму на примере порталов XIII–XV веков/ Вопросы всеобщей истории архитектуры. 2018. Вып. 11. С. 79–97. [Kazaryan A. Y. Stylistic development of Armenian architecture in the Crimea on the example of portals of XIII–XV centuries/ Issues of the universal history of architecture. 2018. Issue 11. P. 79-97.]
26. M. Bloom, Jonathan; S. Blair, Sheila, eds. (2009). "Architecture". The Grove Encyclopedia of Islamic Art and Architecture. Oxford University Press.
27. Шуази О. История архитектуры, 1937. М.: Всесоюзная академия архитектуры С. 225. [Choisy Au. History of Architecture, 1937. Moscow: All-Union Academy of Architecture, P. 225]
28. Ремпель, Л. И. Искусство Среднего Востока. Избр. тр. по истории и теории искусств. М.: Сов. Художник, 1978. 283 с. С.210-211 [Rempel, L. I. The Art of the Middle East. Selected tr. on the history and theory of arts. M.: Sov. Artist publishing house, 1978. 283 p. P. 210-211]
29. Червонная С.М. Искусство Татарии. М.: Искусство, 1987. 351с.- С.169.32 л. илл. [Chervonnoye S.M. The Art of Tatarstan. M.: Iskusstvo, 1987. 351 p. – P. 169. 32 L. illustrated]
30. Бретаницкий Л.С. Художественное наследие Переднего Востока эпохи феодализма. М.: Советский художник, 1988. 251 с. С.190. [Brittanitsky L.S. The artistic heritage of the Front East of the feudal era. Moscow: Soviet Artist publishing house, 1988. 251 p. P. 190.]

#### Информация об авторах

**Айдарова Галина Николаевна**, доктор архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: aidagalnik@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7469-8120

#### Information about the authors

**Galina N. Aidarova**, doctor of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: aidagalnik@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7469-8120

УДК: 726.7

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.22

EDN: VPJTEE



## Колокольня Ф. И. Петонди в структуре ансамбля Кизического Введенского монастыря г. Казани

С.Г. Персова<sup>1</sup>, Н.Р. Сиразеев<sup>1</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** Постановка задачи. Колокольня Кизического Введенского монастыря относится к числу утраченных вертикальных доминант Казани, обладавших особой композиционно-градостроительной значимостью, представлявших большой интерес в планировочном и стилистическом отношении. Исследование посвящено историко-градостроительным изысканиям, объектом которых является данное сооружение. Цель работы сводится к формулированию аргументации в пользу необходимости воссоздания Кизической колокольни. Основными задачами исследования являются: рассмотрение исторических сведений о монастыре в целом и о колокольне в частности; изучение композиционной и планировочной роли сооружения, определение его стилистических особенностей; изложение результатов ландшафтно-визуального анализа.

**Результаты.** В статье предпринимается попытка введения в научный оборот гипотезы о потенциальном градостроительном раскрытии объекта, обозначается многофункциональность Кизической колокольни как планировочного элемента, выявляется позднеклассицистическая атрибутика данного сооружения.

**Выводы.** В ходе проведённого анализа определены позиции, свидетельствующие об уникальности колокольни Кизического Введенского монастыря. Приведённые в исследовании тезисы могут быть использованы в дальнейших научно-реставрационных обоснованиях.

**Ключевые слова:** Кизический Введенский монастырь, архитектор Фома Петонди, колокольня, поздний классицизм, монастырский комплекс, градостроительная доминанта, ландшафтно-визуальный анализ

**Для цитирования:** Персова С.Г., Сиразеев Н.Р. Колокольня Ф. И. Петонди в структуре ансамбля Кизического Введенского монастыря г. Казани // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с.269-282, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.22, EDN: VPJTEE

## The bell tower of T. I. Petondi in the structure of the ensemble of the Kizichesky Vvedensky Monastery in Kazan

S.G. Persova<sup>1</sup>, N.R. Sirazeev<sup>1</sup><sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** Problem statement. The bell tower of the Kizichesky Vvedensky Monastery is one of the lost vertical dominants of Kazan, which had a special compositional and urban significance, and were of great interest in planning and stylistic terms. This article is devoted to historical and urban planning research, the object of which is above-noted structure. The aim of this work is to formulate an argument in favor of the need to restore the Kizic Bell Tower. The main objectives of the research are to review historical information about the monastery in general and the bell tower in particular; to study the compositional and planning role of the structure, to analyze its stylistic design; as well as to present the results of landscape and visual analysis.

*Results.* The article attempts to introduce a hypothesis about the potential urban development of the object into scientific circulation. The multifunctionality of the Kizic Bell Tower as a planning element is indicated and the late classical attributes of this structure are revealed.

*Conclusions.* During the analysis, key points were identified that indicate the uniqueness of bell tower of the Kizichesky Vvedensky Monastery. The theses presented in this study can be used in further scientific and restoration justifications.

**Keywords:** Kizichesky Vvedensky Monastery, architect Thomas Petondi, bell tower, late classicism, monastery complex, urban planning dominant, landscape and visual analysis

**For citation:** Persova S.G., Sirazeev N.R. The bell tower of T. I. Petondi in the structure of the ensemble of the Kizichesky Vvedensky Monastery in Kazan // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 269-282, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.22, EDN: VPJTEE

## 1. Введение

Вопросы воссоздания утраченных высотных доминант занимают отдельное место в архитектурно-реставрационной проблематике. Сопряжённые с этим инициативы приобретают особое значение в городах с богатым историческим прошлым, архитектурная идентичность которых зиждется на системе «культурных ориентиров» [1]. Феномен исторических градостроительных доминант, типологически относящихся к культовым объектам, активно изучается современными исследователями на разных уровнях и в различных аспектах [2-4]. В подавляющем большинстве случаев в российских городах функцию подобных доминантных сооружений выполняли и продолжают выполнять колокольни в структуре храмовых и монастырских комплексов. Вопросу интеграции воссоздаваемых колоколен в сложившуюся градостроительную ситуацию посвящено исследование О. Ю. Назаровой [5].

Важнейшей частью дискуссий о воссоздании доминантных сооружений является доказательная база, формируемая результатами комплексных историко-градостроительных исследований. При изучении архитектуры храмовых и монастырских ансамблей всегда важен междисциплинарный подход, предусматривающий привлечение метода историко-картографического и топонимического анализа [6]. В отечественной литературе прослеживается большой интерес к закономерностям размещения монастырей как исторических планировочных паттернов [7] и объёмно-пространственным вариациям монастырских комплексов [7-9]. Кроме того, всесторонним исследованиям подвергаются отдельные сооружения ансамблей [10]. В трудах зарубежных исследователей монастырские комплексы также являются довольно популярным предметом изысканий [11,12], в рамках которых отдельные сооружения зачастую рассматриваются в качестве планировочных элементов, участвующих в организации архитектурного пространства и выявляющих систему функционального зонирования в структуре монастыря [13].

Особо значимым структурным элементом и неотъемлемой частью монастырского комплекса, безусловно, является колокольня. Следует отметить, что в современных зарубежных источниках мало рассмотрен архитектурно-планировочный аспект исторических колоколен, однако особое внимание уделяется техническим вопросам, связанным с обеспечением сохранности объектов. Большинство работ, посвящённых историческим колокольням, сосредотачивается на практикоориентированном подходе по части инженерных изысканий [14,15], анализе технологий возведения и материальной культуры [16].

В рамках исследования представляется необходимым выявить типологические особенности монастырских колоколен. В данном случае такой анализ базируется на ряде научных трудов. Аспект планировочного взаимодействия колоколен с прочими элементами ансамбля находит отражение в работе Е. Р. Возняк [17]. Не менее значимыми являются исследования, посвящённые в том числе общим принципам стилистического оформления классицистических колоколен и выявлению особой архитектурно-декоративной атрибутики позднего классицизма [18].

Цель исследования сводится к установлению аспектов архитектурной ценности колокольни Кизического монастыря. К основным задачам работы необходимо отнести рассмотрение исторических сведений о монастыре, изучение композиционной и планировочной роли пятиярусной колокольни Ф. И. Петонди, определение особенностей её стилистического оформления, а также изложение результатов ландшафтно-визуального анализа.

## 2. Материалы и методы

Исследование построено на анализе литературных источников, предоставляющих сведения об истории Кизического монастыря и его архитектурно-планировочной организации. Некоторые важные данные также были получены в ходе систематизации архивных материалов, позволивших уточнить ключевые даты в формировании монастырского комплекса. Бесценным источником информации о периоде существования Кизической колокольни и прочих утраченных элементах ансамбля являются материалы Государственного архива Республики Татарстан.

Проведённый в данной статье историко-градостроительный анализ основывается, главным образом, на историко-генетическом методе и методе исторической реконструкции. Условия интеграции рассматриваемой монастырской колокольни в структуру современной городской среды обозначаются исходя из результатов ландшафтно-визуального анализа, в рамках которого натурно и графически исследовались существующие и потенциальные визуальные связи.

Архитектурная стилистика Кизической колокольни анализировалась в сопоставлении с результатами прочих научных исследований, рассматривающих особенности убранства колоколен эпохи классицизма. Это позволило выявить позднеклассицистическую атрибутику в архитектуре постройки Ф.И. Петонди.

## 3. Результаты и обсуждение

Комплекс Кизического Введенского монастыря располагается в правобережной северной части Казани на бровке третей надпойменной террасы Казанки на юго-западном склоне Кизического бугра. Исторически сложившийся ландшафт представлен естественным уклоном рельефа в юго-западном направлении и уцелевшим фрагментом Кизической рощи, где ныне размещается парк Дворца Культуры Химиков. Рассматриваемый объект закрепляет участок древней планировочной связи – Алатского (Уржумского) тракта, который берёт своё начало под Кремлёвским холмом и существует с ханского периода. Размещение обители на пути из Уржума в столицу Казанского края превращало комплекс в один из форпостов города на расстоянии трёх вёрст от кремлёвского холма, а также делало его неотъемлемой частью маршрутов крестного хода.

Ансамбль Кизического монастыря начинает формироваться в конце XVII века как одно из звеньев монастырского кольца Казани. Предтечей новой обители стала деревянная часовня, воздвигнутая на том месте, где в 1654 году процессия со Смоленской иконы Божией Матери, направлявшаяся из Седмиозёрной пустыни в Казань, была встречена горожанами. Согласно преданию, именно совершённый по Уржумскому тракту крестный ход с чудотворной иконой принёс избавление от чумного поветрия. Таким образом, местоположение Кизической обители во многом было предопределено сложившейся к XVII веку трассировкой дороги на Уржум.

Комплекс имел сразу два приоритетных направления для функционального и визуального раскрытия – Кремлёвский холм и транспортно-планировочная ось Уржумского тракта. Причём в первом случае особое значение приобретала визуальная связь с южной частью Казани, во втором – функциональное взаимодействие с дорогой. Подобные ландшафтно-планировочные условия изначально предопределили возникновение в структуре монастырского комплекса двух входных групп: по южному фронту – надвратной каменной церкви в честь Святого Владимира, по западному – надвратной деревянной церкви в честь Иоанна Златоуста. Процесс организации монастырского ансамбля по периметральному принципу последовательно поддерживался возведением новых сооружений взамен разобранных участков крепостной стены. В ходе

подобных строительных преобразований комплекс пополнился зданием настоятельских келий, братским корпусом, а также церковью Успения Пресвятой Богородицы, воздвигнутой на месте некогда существовавшей часовни в честь первосвященника Стефана (рис. 1).



Рис. 1. Графическая реконструкция исторической объемно-пространственной организации монастырского комплекса (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Graphic reconstruction of the historical spatial organization of the monastery complex (illustration by the authors)

Предположительно на месте утраченной надвратной церкви Иоанна Златоуста, которая, по замечанию Никанора Каменского, «в описи 1763 года уже не значится»<sup>1</sup>, в 1835-37 гг. проходило строительство новой пятиярусной колокольни над вратами. Автором проекта и руководителем строительных работ являлся казанский губернский архитектор Ф. И. Петонди. В «Ведомости Казанской Епархии о третьеклассном мужском Кизическом монастыре и о принадлежностях онего за 1852 год» присутствует следующее упоминание о колокольне: «Против холодной церкви на западной стране монастырской ограды вновь построена каменная пятиярусная колокольня, выкрашенная снаружи чернью на масле. На ней крест и глава покрыты белою жестью, а равно и крышки в некоторых местах из белой жести и крашеного железа»<sup>2</sup>.

С композиционной точки зрения, Кизическая колокольня, безусловно, являлась важнейшей градостроительной доминантой, поддерживавшей визуальную связь с Кремлёвским холмом (рис. 2). В заречье наиболее важное пространственное взаимодействие осуществлялось, главным образом, с находящимися в прямой видимости колокольнями Седмиозёрной пустыни и Зилантова монастыря. Кроме того, надо полагать, сооружение Ф. И. Петонди было задействовано в местной системе оповещения. Высота колокольни без венчающего креста, по исследованиям Никанора Каменского, составляла 25 саженей. Для Казани первой половины XIX века это было беспрецедентное строение, ставившее Кизицы в архитектурном отношении в один ряд с крупнейшими лаврами империи. А. В. Рошектаев прослеживает любопытную тенденцию, характеризующую развитие большинства монастырских комплексов в России XIX

<sup>1</sup> Никанор (Каменский), архиепископ. Казанский сборник статей. – Казань, 1909 г.

<sup>2</sup> ГА РТ. Ф. 4. Оп. 84. Д. 256. «Ведомость Казанской Епархии о третьеклассном мужском Кизическом монастыре и о принадлежностях оного за 1852 год».

столетия: «Старинные обители, просуществовав уже не один век со скромными колоколенками при церквях (как и Кизическая со своей шатровой колоколенкой при соборе), повсеместно стремились возвести высокие многоярусные "маяки"<sup>1</sup>. П. М. Дульский отмечает, что высокая классицистическая колокольня ни композиционно, ни стилистически не вписывалась в общий ансамбль монастыря, «нарушая уют монастырского городка»<sup>2</sup>.



Рис. 2. Историческая визуальная связь монастыря с Кремлёвским холмом  
(Источник: <https://pastvu.com/p/835544>)

Fig. 2. Historical visual connection of the monastery with the Kremlin Hill  
(Source: <https://pastvu.com/p/835544> )

В планировочном отношении вновь возведённая колокольня, прежде всего играла роль западного входа, ставшего в силу многих обстоятельств главной входной группой монастырского комплекса (рис. 3). На чисто символическом уровне подобное расположение колокольни позволяло организовывать движение прихожан с запада на восток, в направлении центрального храма, что имеет глубокое сакральное значение в системе христианства. В первой половине XIX века в связи с многочисленными строительными работами, проводившимися при настоятеле Гурии, в структуре монастыря чётко обозначилось деление на «светскую» и «приватную» зоны. Именно колокольней на вратах предварялся вход в общедоступную часть обители. Западная линия монастыря во многом стала узловым элементом ансамбля в связи ростом социально-экономической значимости Уржумского тракта, по которому в Казань на богомолье и ярмарку прибывали жители Вятки и Уржума. Кроме того, колокольня обозначала планировочную связь монастырского комплекса с жилыми кварталами Кизической слободы, располагавшейся по другую сторону от дороги. Вход в обитель предварялся обширной площадью, которая непосредственно примыкала к дороге и благодаря террасообразному рельефу находилась на более высоких отметках.

<sup>1</sup> Рощектаев А. В. Кизический мужской монастырь города Казани: история становления от приходского храма до обители (с XVII века по 2006 г.). – Казань, 2011.

<sup>2</sup> Дульский П.М. Зилант и Кизицы. Очерк П. М. Дульского. Казань, 1917 г.

Типологически Кизическая колокольня относится к категории отдельно стоящих, что зачастую является отличительной чертой монастырских комплексов<sup>1</sup>. Предположительно сооружение размещалось на одной оси с основным четвериком Введенского храма. Согласно диссертационному исследованию Н. В. Хомутовой, подобное решение является типичным: «Такое расположение чаще всего имеют надвратные, проездные колокольни». Таким образом, в совокупности с центральным храмом монастырского ансамбля колокольня формирует «регулярно-направленную» композицию [17].



Рис. 3. Колокольня как главный входной узел монастыря. Вид со стороны Уржумского тракта (Источник: <https://chronograph.livejournal.com/353484.html?replyto=5466572>)  
Fig. 3. The bell tower as the main entrance node of the monastery. View from the Urzhumsky tract (Source: <https://chronograph.livejournal.com/353484.html?replyto=5466572>)

В стилистическом отношении колокольня в целом следовала формам позднего классицизма. Объёмно-пространственную композицию сооружения составляли пять последовательно сужавшихся яруса: четыре четверика, верхний из которых имел скошенные углы, и венчающий пятый ярус, представлявший собой цилиндрический объём (рис. 4). Из построений, выполненных в ходе графической реконструкции, следует, что основной объём первого яруса имел форму куба. По каждому из фасадов нижний проходной четверик дополнялся выступающим дорическим четырёхколонным портиком. Необходимо отметить, что в позднеклассицистическую эпоху подобный приём оформления нижнего яруса колоколен стал иконографическим и широко использовался в проектной практике, о чём свидетельствуют чертежи в альбомах образцовых проектов<sup>2</sup>. Дверные проёмы в Кизической колокольне, по всей видимости, имелись лишь в западной и восточной стенах, по северному и южному фасадам соответствующее место занимали декоративные ниши (рис. 5).

<sup>1</sup> Хомутова Н. В. Архитектура колоколенесущих сооружений Европейской части России : специальность 18.00.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры – Санкт-Петербург, 2007. – 190 с.

<sup>2</sup> Собрание планов, фасадов и профилей для строения каменных церквей. СПб.: Тип. Медицинского департамента Министерства внутренних дел, 1824. [4], 40 с., 104 л. черт.



Рис. 4. Ярусная композиция и архитектурно-стилистическое убранство Кизической колокольни (Источник: а) <https://pastvu.com/p/835043>; б) <https://sam-glor.livejournal.com/154531.html?view=comments>)

Fig. 4. The tiered composition and architectural and stylistic decoration of the Kizic Bell Tower (Source: a) <https://pastvu.com/p/835043>; b) <https://sam-glor.livejournal.com/154531.html?view=comments>)

Низкий четверик второго яруса классицистических колоколен иногда определяется в терминологическом аппарате как «полуярус». На этом уровне сооружение традиционно дополняется акцентным элементом в виде полуциркульного оконного проёма, который в архитектуре колоколен XVIII века трактовался как трёхчастное термальное окно. По справедливому замечанию Т. А. Гильдиной, «интерпретация [данного] элемента подвергается существенным изменениям в пропорциях поздних проектов» [18]. Подобную тенденцию можно проследить и в убранстве постройки Ф. И. Петонди, применившего простую полуциркульную арку в обрамлении архивольта.

Третий ярус, в соответствии с принципом суперпозиции, решён в ионическом ордере. Высокий четверик, в котором размещался ярус звона, имел по каждому из фасадов большой световой проём в пол. Четверик фланкировался пилястрами, между которыми располагались полукруглые ниши. В верхней части объёма устроен большого выноса карниз с дорическими мутулами. Четверик четвёртого яруса, также оснащённый колоколами, как уже было сказано, имел усечённые углы, позволявшие переходить к восьмериковому объёму. По словам Гильдиной, подобная форма также является характерной для позднего классицизма и отражает переходный этап к эклектической манере. Каждый угол четвёртого яруса выделен трёхчетвертной коринфской колонной. Завершающий объём колокольни отличался цилиндрической формой и был украшен восемью колоннами, имевшими предположительно композитные капители и размещавшимися по аналогии с предыдущим уровнем. Последний и предпоследний ярусы Кизической колокольни были окружены обходными балконами. Как утверждает А. Н. Яковлев, классицистическая ярусная композиция, интегрирующая цилиндрические объёмы, впервые была разработана Дж. Кваренги в целях создания образа колокольни-маяка<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Православная энциклопедия / Под редакцией Патриарха Московского и всея Руси Кирилла. Том 36. – Москва : Православная религиозная организация Церковно-научный центр "Православная энциклопедия", 2015



Рис. 5: а) Графическая реконструкция западного фасада колокольни; б) Графическая реконструкция разреза колокольни (иллюстрации авторов)

Fig. 5: a) Graphic reconstruction of the western facade of the bell tower; b) Graphic reconstruction of the bell tower section (illustrations by the authors)

Увенчивалась колокольня массивным луковичным куполом, выполненным в абсолютно нехарактерной для классицизма манере. Никанор Каменский описывал завершение колокольни как «большой сферический сплющенный к краям шар, сделанный из белой жести». Главка имела двухчастную композицию, включавшую основной купольный объём и малую луковицу, через которую осуществлялся переход к венчающему трёхметровому кресту. Надо полагать, в такой, довольно свободной трактовке формы также сказывались эклектические веяния, позволявшие отступать от регламентирующих шаблонных решений и создавать прецедент апелляции к более традиционным русским мотивам.

Никанор Каменский отмечал, что в последние годы своего существования колокольня во многих частях пришла в ветхость. О последних поновлениях свидетельствуется в «Ведомости о Казанском Кизическом третьеклассном мужском монастыре за 1917 год»: «В 1910 году побелена известью, и выкрашены медянкою крыши на карнизах<sup>1</sup>. С приходом советской власти положение монастыря резко изменилось. В

<sup>1</sup> ГА РТ. Ф. 141. Оп. 87. Д. 32. «Ведомость о Казанском Кизическом третьеклассном мужском монастыре за 1917 год».

1920-е гг. было принято решение о разборке монастырского комплекса в пользу новостроек близлежащего рабочего района. 56-метровая колокольня была разрушена во время очередного комсомольского субботника, состоявшегося 29 апреля 1929 года, в годовщину основания обители, день памяти мучеников Кизических<sup>1</sup>. В условиях острого дефицита стенового материала кирпич, оставшийся от монастырской колокольни, вероятнее всего, был пущен на возведение новых объектов гражданского строительства.

Снос величественного сооружения Ф. И. Петонди обернулся большой утратой для монастырского комплекса и для города в целом, что актуализирует различные формы рассуждений относительно воссоздания данного объекта. Вопрос о регенерации утраченных высотных доминант активно проблематизируется в современном архитектурно-реставрационном дискурсе. Основным критерием ценности подобных сооружений, как правило, является их участие в формировании исторического силуэта города. Однако при интеграции колокольни Кизического монастыря в современную градостроительную ситуацию неизбежно придётся столкнуться с проблемой трансформировавшегося пространственного масштаба близлежащей застройки, в структуре которой воссоздаваемый объект будет выполнять функцию исключительно локальной доминанты. В отсутствие соответствующих режимных ограничений по высотности застройки в правобережной части Казани бывшие территории Кизической слободы и, в частности, кварталы, расположенные к югу от ул. Вахитова, на современном этапе стали застраиваться высотными жилыми комплексами, а также многоэтажными башнями-общежитиями Казанского государственного энергетического университета. Как следствие, приходится констатировать, что в панораме правобережья колокольня Ф. И. Петонди, вероятнее всего, займёт только рядовое положение. Тем не менее, учитывая все вышеизложенные соображения, в данном случае представляется возможным исходить из высказывания А. Ю. Назаровой о том, что «несмотря на увеличение этажности фоновой застройки и изменившиеся соотношения подобной фоновой застройки и вертикальных доминант, колокольни в структуре городской среды способствуют восстановлению иерархии в системе вертикальных доминант и акцентов» [5]. Иными словами, восстанавливаемые высотные доминанты включаются в систему опорных элементов пространственного каркаса города.

Ряд доводов в пользу необходимости воссоздания утраченной колокольни позволяет привести ландшафтно-визуальный анализ, проведённый в условиях современной градостроительной ситуации.

1. Исследование градостроительного раскрытия современного монастырского комплекса свидетельствует о затруднённости его визуального восприятия, в частности, из-за композиционной завесы, формируемой сразу несколькими крупными торговыми комплексами на стрелке проспекта Ибрагимова и ул. Декабристов. Радиус градостроительного раскрытия монастыря достигает 500 м по улицам Лушникова и Яруллина и 300 м по улице Правосудия. В данном случае обнаруживает свою востребованность функция визуального ориентира, позволяющего решить проблему неприметности, затяжности монастыря в окружении высотной застройки (рис. 6).

<sup>1</sup> А. М. Елдашев «Свято-Введенский Кизический мужской монастырь» изд-во КДС, Казань-2003 г.



Рис. 6. Анализ современного градостроительного раскрытия монастырского комплекса (иллюстрации авторов)

Fig. 6. Analysis of the modern urban development of the monastery complex (illustrations by the authors)

2. Несмотря на сплошной фронт современной высотной застройки в прибрежной зоне в районе Ленинской дамбы, на сегодняшний существует возможность восстановления исторической визуальной связи между Кизической колокольней и объектами Казанского Кремля через потенциальный видовой коридор улицы Яруллина (рис. 7).

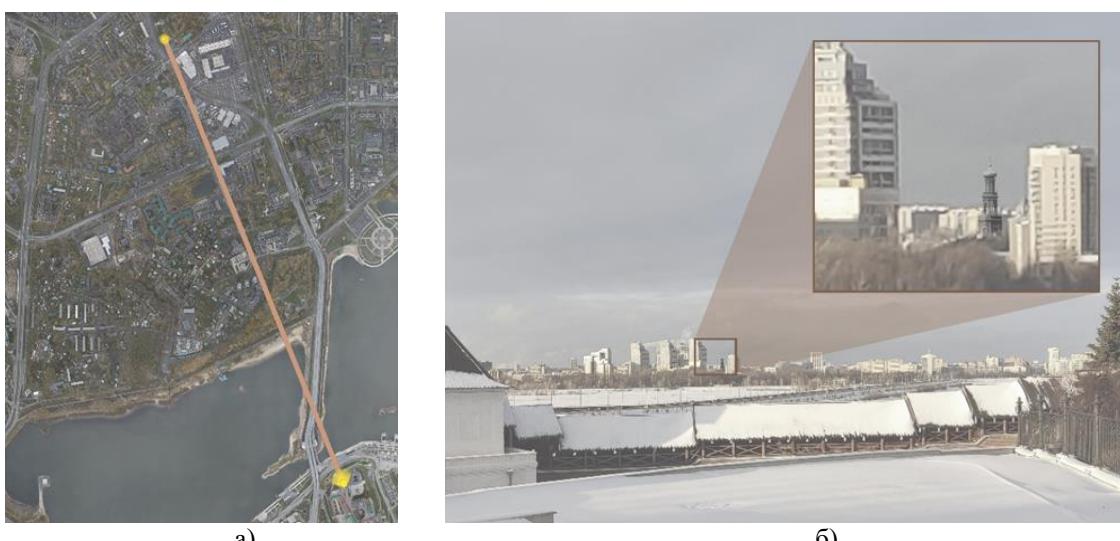


Рис. 7: а) Видовой коридор через ул. Яруллина; б) Фотомонтаж. Вид с Кремлёвского холма (иллюстрации авторов)

Fig. 7: a) The view corridor through Yarullina Street; b) Photo montage. View from the Kremlin Hill (illustrations by the authors)

3. В существующей градостроительной ситуации, сложившейся преимущественно в советский период, Кизическая колокольня с её динамичной вертикальной композицией может выступать также своеобразным знаком, инструментом презентации, позволяющим ассоциировать рассматриваемую территорию с исторической частью города (рис. 8).



Рис. 8. Фотомонтаж. Интеграция колокольни в современную градостроительную ситуацию  
(иллюстрация авторов)

Fig. 8. Photo montage. Integration of the bell tower into the modern urban planning situation  
(illustration by the authors)

Воссоздание классицистической колокольни Ф. И. Петонди является весьма интересной инициативой в свете феномена *genius loci*, поскольку данное сооружение на чисто интуитивном уровне будет восприниматься не только как композиционная, но и как сакральная доминанта, дополняющая городской текст новыми смыслами. Необходимость восстановления колокольни в прежних формах может быть обоснована тем, что данное сооружение, уникальным образом сочетавшее в своём убранстве классицистическую основу с национальным русским компонентом, создавало прецедент довольно самобытной архитектуры, являясь ценным источником информации об архитектурной идентичности Казани, её историко-культурном коде.

Рассуждения об архитектуре колокольни Кизического Введенского монастыря не исчерпываются представленным в данном исследовании материалом. Дальнейшие изыскания в этой области могут быть сосредоточены на уточнении системы пропорционирования ордерных элементов, а также выстраивании предположений относительно объёмно-планировочной структуры рассматриваемого сооружения, в частности, чрезвычайно важным представляется вопрос организации лестничных связей между ярусами. Данные исследования должны в обязательном порядке основываться на работе с соответствующими аналогами.

#### 4. Заключение

1. Строительство пятиярусной колокольни Ф. И. Петонди явилось важнейшей вехой в истории монастыря, поскольку подобное грандиозное сооружение свидетельствовало об авторитете и статусности Кизической обители вопреки её третьеклассному положению, определённому екатерининскими реформами. Это заставляло воспринимать монастырь как крупнейшую святыню и, вместе с тем, довольно уникальное явление.

2. С функциональной точки зрения, Кизическая колокольня являлась важнейшей вертикальной доминантой, была задействована в местной системе оповещения, играла роль визуального ориентира для северных трактов, а также использовалась в качестве главной входной группы на территорию монастырского комплекса. Стилистика колокольни в целом приобретает позднеклассицистическое звучание, обнаруживая также некоторые эклектические мотивы, что проявляется в использовании архитектором Ф. И. Петонди четверикового яруса со склоненными углами и нехарактерной для классицизма массивной луковичной главки.

3. Результаты ландшафтно-визуального анализа, проведённого в условиях современной градостроительной ситуации, свидетельствуют о существовании видового коридора между северной частью Кремлёвского холма и предполагаемым местоположением утраченной Кизической колокольни. Через этот коридор может осуществляться историческая визуальная связь монастырской доминанты с Казанским Кремлём. Кроме того, воссоздание Кизической колокольни позволит решить проблему неприметности монастыря в современной высотной застройке.

**Список литературы / References**

1. Айдарова-Волкова Г. Н. "Старое" и "новое" в архитектуре древней Казани - два крыла устойчивого сохранения и развития исторического центра // Архитектура и строительство России. – 2018. – № 3(227). – С. 20-25 [Aidarova-Volkova, G. N. "Old" and "new" in the architecture of ancient Kazan - two wings of sustainable preservation and development of the historical center // Architecture and Construction of Russia. – 2018. – № 3(227). – P. 20-25]. – EDN YLQTLF.
2. Мандзюк Л. С. Шумилкина Т. В. Проблема воссоздания исторических архитектурных доминант Нижнего Новгорода // IX Всероссийский фестиваль науки: сборник докладов в 2-х томах, Нижний Новгород, 23–24 октября 2019 года. Том 1. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 438-442 [Mandzyuk L. S., Shumilkina T. V. The problem of recreating historical architectural monuments of Nizhny Novgorod // IX All-Russian Science Festival: collection of reports in 2 volumes, Nizhny Novgorod, October 23-24, 2019. Volume 1. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2020. – P. 438-442]. – EDN NKSITN.
3. Пестерев К. А., Баулина Е. Н. Воссоздание утраченных храмов Вологды как высотных доминант города // Архитектурные сезоны в СПбГАСУ : Сборник материалов XII Регионального творческого форума с международным участием, Санкт-Петербург, 19–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – С. 41-43 [Pesterev K. A. Baulina E. N. Recreating the lost temples of Vologda as high-rise dominants of the city // Architectural seasons in St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering: Collection of materials of the XII Regional Creative Forum with international participation, St. Petersburg, April 19-22, 2022. – St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022. - P. 41-43]. – EDN YRPTAS.
4. Саргсян А. В., Семенцов С. В. Восстановление градостроительной доминанты в исторической зоне Малой Коломны // Актуальные проблемы архитектуры: Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 85-91 [Sargsyan A.V., Sementsov S. V. Restoration of urban planning dominance in the historical zone of Malaya Kolomna // Actual problems of architecture: Materials of the 71st All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. In 2 parts, St. Petersburg, April 04-06, 2018. – St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. – P. 85-91]. – EDN HVISWW.
5. Назарова А. Ю. Восстановление высотных доминант при сохранении исторического силуэта: на примере воссоздания колокольни Новодевичьего монастыря в Санкт-Петербурге // Научный аспект. – 2022. – Т. 5, № 6. – С. 603-614 [Nazarova A. Yu. Restoration of high-rise dominants while preserving the historical silhouette: on the example of recreating the bell tower of the Novodevichy Monastery in St. Petersburg // Scientific aspect. - 2022. - Vol. 5, No. 6. – P. 603-614].
6. Kostovska, S.K., Gordova, Y.Y., Herzen, O.A., Herzen, A.A. Historical-Cartographic and Toponymic Approaches in Geoarchaeology: A Case Study of Temples and Temple Complexes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences (2022) 978-3-031-46423-2 – [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46424-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46424-9_3)
7. Кисlyх Т. А. Объемно-планировочная структура монастырских комплексов Ленинградской области // Научные труды. – 2019. – № 48. – С. 18-34 [Kislykh T. A. The spatial planning structure of the monastery complexes of the Leningrad region // Scientific works. – 2019. – No. 48. – P. 18-34]. – EDN FHNZEY.
8. Кисlyх Т. А. Объемно-планировочная структура монастырских комплексов Псковской области // Университетский научный журнал. – 2022. – № 70. – С. 78-

- 91 [Kislykh T. A. Space-planning structure of monastery complexes in the Pskov region // University Scientific Journal. – 2022. – No. 70. – P. 78-91]. – DOI 10.25807/22225064\_2022\_70\_78. – EDN ZPIXKB.
9. Крутов А. А., Вдовенкова А. С., Тимохина Е. В., Панкратова А. А. Принципы размещения построек в монастырских комплексах на примере монастырей// Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XV межвузовской научно-технической конференции, Рязань, 26–28 апреля 2017 года / Под редакцией начальника НИО Платонова А.А., канд. техн. наук Бакулиной А.А. Том I. – Рязань: ООО «Рязаньпроект», 2017. – С. 12-15 [Krutov A. A., Vdovenkova A. S., Timokhina E. V., Pankratova A. A. Principles of the placement of buildings in monasteries on the example of monasteries // New technologies in the educational process and production: Materials of the XV Interuniversity scientific and technical conference, Ryazan, April 26-28, 2017 / Edited by the head of the Research Institute Platonov A.A., Candidate of Technical Sciences Bakulina A.A. Volume I. – Ryazan: LLC"Ryazanproekt", 2017. – P. 12-15]. – EDN ZIPZZB.
10. Фомин И. В. Персова С. Г. Реставрация памятника (ЮНЕСКО) архитектуры XVI века - Успенского собора с фресковой живописью и иконостасом (о.Свияжск). Нормализация микроклимата. Обеспечение условий сохранности // Современное состояние и перспективные подходы к реставрации и консервации художественных произведений: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Москва, 25–27 мая 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2022. – С. 73-85 [Fomin I. V., Persova S. G. Restoration of the monument (UNESCO) of architecture of XVI century - the Assumption Cathedral with frescoes and iconostasis (Sviyazhsk Island). Normalization of the microclimate. Ensuring safety conditions // The current state and promising approaches to the restoration and conservation of works of art: A collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation), Moscow, May 25-27, 2022. – Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art)", 2022. – P. 73-85]. – EDN ITZMKW.
11. P. Lewińska, M. Róg, A. Zadlo, S. Szombara. To save from oblivion: Comparative analysis of remote sensing means of documenting forgotten architectural treasures – Zagórz Monastery complex, Poland. Measurement 189 (2022) 0263-2241 – <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110447>.
12. Polymeri, E., Mouzakis, C., Efstathiou, A., Pantazis, G. The Bell – Tower of Saint Barbaros in the Medieval ‘Borgo’ of Potamos in Corfu: Historical Documentation and Multi-disciplinary Proposal for its Preservation. In: Osman, A., Moropoulou, A. (eds) Springer Proceedings in Materials, vol. 16 (2022) 978-3-031-03794-8 – [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03795-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03795-5_7).
13. Pernas Alonso, I. The Grand Staircase in San Xoan de Poio Monastery. In: Agustín-Hernández, L., Vallespín Muniesa, A., Fernández-Morales, A. (eds) Graphical Heritage (2020) 978-3-030-47978-7 – [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47979-4\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47979-4_39)
14. M. Valente. Earthquake response and damage patterns assessment of two historical masonry churches with bell tower. Engineering Failure Analysis (2023), Volume 151, 1350-6307 – <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107418>.
15. M. Valente. Seismic vulnerability assessment and earthquake response of slender historical masonry bell towers in South-East Lombardia. Engineering Failure Analysis, Volume 129 (2021) 1350-6307 – <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105656>.
16. E. Cantisania, S. Calandraab, S. Baronecd, S. Caciaglie, M. Fedid, C. A. Garzoniof, L. Licciolid, B. Salvadoria, T. Salvaticib, S. Vettoria. The mortars of Giotto’s Bell Tower (Florence, Italy): raw materials and technologies. Construction and Building Materials, Volume 267 (2021) 0950-0618 – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120801>

17. Возняк Е. Р., Горюнов В. С., Семенцов С. В. Архитектура православных храмов на примере храмов Санкт-Петербурга: учеб. пособ. / СПбГАСУ. – СПб., 2010. – 80 с. [Vozniak E. R., Goryunov V. S., Sementsov S. V. Architecture of Orthodox churches on the example of the temples of St. Petersburg: textbook. handbook; SPbGASU. – St. Petersburg, 2010. – 80 p.].
18. Гильдина Т. А., Ральников. Д. Н. Типология колоколен православных храмов Вятской губернии первой половины XIX века // Манускрипт. – 2021. – Т. 14, № 8. – С. 1703-1710. – DOI 10.30853/mns210283 [Gildina T. A., Ralnikov D. N. Typology of the bell towers of Orthodox churches of the Vyatka province of the first half of XIX century / T. A. Gildina, // Manuscript. – 2021. – Vol. 14, No. 8. – P. 1703-1710]. – DOI 10.30853/mns210283. – EDN LPAOJO.

#### Информация об авторах

**Персова Светлана Глебовна**, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: spersova@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-8772-1203

**Сиразеев Нияз Рустемович**, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: kniyaz.s@mail.ru, ORCID: 0009-0003-4970-3137

#### Information about the authors

**Svetlana G. Persova**, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: spersova@yahoo.com, ORCID: 0000-0001-8772-1203

**Niyaz R. Sirazeev**, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: kniyaz.s@mail.ru, ORCID: 0009-0003-4970-3137

---

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](mailto:patent@kgasu.ru).

---

**Известия КГАСУ**  
2024г., № 2(68)

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.

Регистрационный номер: ПИ № ФС77-77410 от 17.12.2019г.

Подписной каталог ГК Урал-Пресс  
Индекс издания – 36939

Распространение: свободная цена

Подп. к печати 28.06.2024

Формат 60×84/8

Заказ № 99

Бумага тип. №1

Усл.-печ. л 35,5

Уч.-изд. л. 36,4

Тираж 500 экз.

I завод – 100

Дата выхода в свет: 02.07.2024г.

Отпечатано в Издательстве КГАСУ: 420043, Республика Татарстан, г. Казань,  
ул. Зеленая, д. 1