

Научно-технический журнал

Издается с 2003 года.

Выходит шесть раз в год.

№ 6 (122) 2025

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
(ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»)

Главный редактор:

Колчунов В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Заместители главного редактора:

Гордон В.А., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Савин С.Ю., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Финадеева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Редколлегия:

Акимов П.А., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Бакаева Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Бок Т., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Булгаков А.Г., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)

Каприлов С.С., акад. РААСН, д.т.н., проф.
(Россия)

Колесникова Т.Н., д-р арх., проф. (Россия)

Колчунов Вл.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Коробко А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Король Е.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Кривошапко С.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кудряшов Н.И., канд. арх., проф. (Россия)

Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)

Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)

Птичникова Г.А., д-р арх., проф. (Россия)

Реболж Д., д-р техн. наук, проф. (Словения)

Римшин В.И., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Себешев В.Г., почетный чл. РААСН, канд. техн.
наук, проф. (Россия)

Тамразян А.Г., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Травуш В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Трещев А.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Тур В.В., иностр. чл. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Федорова Н.В., советник РААСН, д-р. техн. наук,
проф. (Россия)

Шах Р., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Исполнительный редактор:

Амелина М.А., (Россия)

Адрес редакции:

302030, Орловская обл., г. Орёл,

ул. Московская, д. 77.

Тел.: +79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе

по надзору в сфере связи, информационных

технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169

от 16 сентября 2016 г.

Подписанной индекс 86294

по объединенному каталогу «Пресса России»

на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Кабанцев О.В., Симаков О.А., Ле Во Фу Тоан. Испытание усиленных натуры образцов из каменной кладки	3
Колчунов Вл. И. «Представительный объем» в механике железобетона.....	14
Мариничев М.Б., Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Механизм деформаций грунта при компрессионном сжатии пробы.....	25

Безопасность зданий и сооружений

Савин С.Ю., Лизогуб А.А. Деформирование при опорных зон ригелей железобетонных рамных каркасов в запредельных состояниях.....	36
Федоров В.С., Левитский В.Е. Специфика реакции бетона на воздействие высокой температуры.....	47

Архитектура и градостроительство

Волченко О.В., Чечель И.П. Реконструкция зданий школ в образовательные комплексы полного дня (на примере Белгородской области).....	60
Гурьев А.С., Енин А.Е., Гурьев С.Н. Принципы проектирования цветовой среды общественных пространств города.....	78

Строительные материалы и технологии

Ельчищева Т.Ф., Монастырев П.В., Езерский В.А., Таскалиев А.Т. Применение опоки Шиповского месторождения Республики Казахстан в дорожном строительстве.....	88
Ерофеев В.Т., Гончарова М.А., Тараканов О.В., Светлов Д.А., Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Кучин В.Н., Светлов Д.В. Прочность и деформируемость биоцидных цементных композитов..	99
Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Черных А.А. Изучение эксплуатационных свойств модифицированного бетона на основе полидисперсного вяжущего для гидромелиоративного строительства.....	123

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по группе научных специальностей 2.1. – Строительство и архитектура: 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки); 2.1.2. – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки); 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки); 2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки); 2.1.9. – Строительная механика (технические науки); 2.1.10. – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки); 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура); 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура); 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура). Индексируется в РИНЦ, RSCI (Russian Science Citation Index наплатформе Web of Science)

Scientific and technical journal
The journal is published since 2003.
The journal is published 6 times a year.

№ 6 (122) 2025

BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education
«Orel State University named after I.S. Turgenev»
(Orel State University)

Editor-in-Chief
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Savin S.Yu., candidate sc. tech., docent (Russia)
Finadeeva E.A., candidate sc. tech., docent (Russia)

Editorial Board
Akimov P.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bakaeva N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bock T., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Bulgakov A.G., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)
Kapriev S. S., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kolesnikova T.N., doc. arc., prof. (Russia)
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korol E.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Krivoshapko S.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kudryashov N.N., candidate arc., prof. (Russia)
Lafhaj Z., doc. sc. tech., prof. (France)
Melkumov V.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Orlovic R.B., doc. sc. tech., prof. (Poland)
Ptichnikova G.A., doc. arc., prof. (Russia)
Rebolj D., doc. sc. tech., prof. (Slovenia)
Rimshin V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Sebeshev V.G., candidate sc. tech., prof. (Russia)

Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treschev A.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tur V.V., doc. sc. tech., prof. (Belorussia)
Fedorov V.S., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Fedorova N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)

Managing Editor:
Amelina M.A., (Russia)

The edition address:
302030, Oryol region., Oryol,
Moskovskaya Street, 77
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications
The certificate of registration:
ПИ №ФС 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossiya**»
86294 on the websites www.pressa-rf.ru and www.akc.ru

© Orel State University, 2025

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Kabancev O.V., Simakov O.A., Le Vo Phu Toan. Testing of reinforced large-scale masonry samples.....	3
Kolchunov V.I. Representative volume element in the mechanics of reinforced concrete.....	14
Marinichev M.V., Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Determination of soil creep deformations.....	25

Building and structure safety

Savin S.Y., Lizahub A.A. Multi-stage deformation of plastic hinges in RC frame beams at accidental actions.....	36
Fedorov V.S., Levitsky V.E. Specificity of concrete response to high temperature.....	47

Architecture and urban planning

Volichenko O.V., Chechel I.P. Renovation of school buildings to full-time educational complexes (using the example of the Belgorod region).....	60
Guriev A.S., Yenin A.E., Guriev S.N. Principles of designing the color environment of public spaces in the city.....	78

Construction materials and technologies

Elchishcheva T.F., Monastyrev P.V., Yezersky V.A., Taskaliev A.T. Application of opoka from the Shipovskoe deposit of the Republic of Kazakhstan in road construction.....	88
Erofeev V.T., Goncharova M.A., Tarakanov O.V., Svetlov D.A., Maksimova I.N., Erofeeva I.V., Kuchin V.N., Svetlov D.V. Strength and Deformability of Biocidal Cement Composites.....	99
Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Chernykh A.A. Study of performance properties of modified concrete based on polydispersed binding agent for water reclamation construction.....	123

The journal Building and Reconstruction (Stroitel'stvo i rekonstruktsiya) have being included by Higher Attestation Commission in the List of peer-reviewed scientific journals, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of science should be published, for the group of scientific specialties 2.1. - Construction and architecture: 2.1.1. – Building constructions, buildings and structures (technical sciences); 2.1.2. – Soils and foundations, underground structures (technical sciences); 2.1.5. – Building products and construction materials (technical sciences); 2.1.7. – Construction technology and organization (technical sciences); 2.1.9. – Structural mechanics (technical sciences); 2.1.10. – Environmental safety in construction and urban economy (technical sciences); 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture); 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture); 2.1.13. – Urban planning, planning of rural settlements (architecture). The journal is indexed in RSCI, RSCI on the Web of Science.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012

DOI: 10:33979/2073-7416-2025-122-6-1

О.В. КАБАНЦЕВ, О.А. СИМАКОВ, ЛЕ ВО ФУ ТОАН¹

¹Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва,
Россия

ИСПЫТАНИЕ УСИЛЕННЫХ НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

Аннотация. Массовое восстановление зданий и сооружений после сейсмических воздействий и в зонах боевых действий с характерными последствиями минно-взрывных повреждений требует особых эффективных методов усиления конструкций, что влечет необходимость разработки соответствующих нормативно-методических обоснований для данных методик. Данные решения в первую очередь должны базироваться на экспериментальных исследованиях, проведенных на натурных близких к реальным образцах, и воздействиях, также соответствующих фактическим схемам нагружения конструкций. В этой связи становится вопрос выбора методик проведения испытаний с учетом важных в данном случае факторов: повторяемость и подобие, а также возможность масштабирования в случае невозможности проведения испытаний на образцах с размерами близких к реальным. Рассмотренные в настоящей статье вопросы как раз посвящены выбору методики испытания конструкций из каменной кладки после повреждений эквивалентными сейсмическими и минно-взрывными воздействиями, разработано конкретное предложение по проведению испытаний.

Ключевые слова: испытания, каменная кладка, усиление, восстановление, торкретбетон.

OL.V. KABANCEV, OL.A. SIMAKOV, LE VO PHU TOAN¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

TESTING OF REINFORCED LARGE-SCALE MASONRY SAMPLES

Abstract. The massive restoration of buildings and structures after seismic impacts and in combat zones with the characteristic consequences of mine and explosive damage requires particularly effective methods of strengthening structures, which necessitates the development of appropriate regulatory and methodological justifications for these techniques. These solutions should primarily be based on experimental studies conducted on field samples close to real samples, and impacts that also correspond to actual structural loading patterns. In this regard, it becomes a question of choosing test methods, taking into account important factors in this case: repeatability and similarity, as well as the possibility of scaling if it is impossible to conduct tests on samples with dimensions close to real ones. The issues discussed in this article are devoted to the choice of methods for testing masonry structures after damage caused by equivalent seismic and mine-explosive effects, and a specific test proposal has been developed.

Keywords: testing, masonry, reinforcement, restoration, shotcrete.

1. Введение

Задача усиления существующих зданий возникает по целому ряду причин [1, 2] среди которых можно отдельно выделить:

- восстановление конструкций после минно-взрывных воздействий;
- восстановление конструкций после сейсмических воздействий;
- превентивное повышение сейсмостойкости зданий и сооружений в следствие изменения в нормировании сейсмической опасности (сейсморайонирования).

Во многих случаях задача усиления характеризуется массовостью и большими объемами проводимых работ. При этом причины, формирующие задачи усиления, имеют широкий спектр реализации в виде как видимых внешних повреждений различных размеров, так и повреждений или деградации внутренних связей элементов конструкции.

Реализация задачи усиления повреждённого/разрушенного единичного здания в некотором районе может быть реализована с достижением эффективности по единичному параметру или узкой группе параметров. В случае массового усиления зданий и сооружений основным параметром выбора метода усиления (при гарантированном обеспечении требуемого уровня усиления) становится эффективность по критериям стоимости и скорости проведения работ, дополнительным фактором для отдельных сооружений становится возможность проведения работ без полного вывода здания из эксплуатации.

Таким образом выделяются направления усиления строительных конструкций, учитывающие:

- оптимальное использование материалов (стремление к минимально обоснованным сечениям, расходу);
- механизацию проведения работ (возможное применение робототехники).

Одним из таких методов, учитывающих современные тенденции массового усиления строительных конструкций, является усиление односторонними аппликациями из торкретбетона.

Сама технология усиления известна достаточно давно [3], в то же время остается ряд вопросов в части обоснованного оптимального проектирования усиления.

С целью разработки методик расчета, конструктивных и технологических решений необходимо проведение испытаний усиленных конструкций.

Рассматривая работу каменной кладки в части выделенных направлений массового усиления конструкций, необходимо воссоздание монолитности [4-6], в особенности для поврежденных конструкций, имеющих характерные повреждения [7-10].

Обоснованные рекомендации по расчету и конструированию могут быть основаны только на результатах экспериментальных исследований, при этом в качестве объекта должны быть использованы натурные фрагменты зданий.

Проводя анализ имеющихся методик испытаний фрагментов каменной кладки, можно выделить 5 принципиальных схем исследований (рис. 1).

Схема рис. 1.а была применена в исследованиях [11], а впервые была использована в опытах начала XX века. Данная схема испытаний предполагает близкое к диагональному нагружению при этом превалируют сдвиговые усилия, а с определенного момента нагрузления формируется отрыв верхних рядов кладки в месте приложения нагрузки.

Схема 1.б является некоторым усовершенствованием испытаний на главные растягивающие напряжения, в то же время фактические эксперименты показали механизм разрушения простенка сопоставимый с внецентренным сжатием. Такой вид напряженно-деформированного состояния не является характерным для сейсмических воздействий.

В схемах 1.в и 1.г предполагается наибольшее приближение к работе реальной конструкции при действии горизонтальных нагрузок, возникающих при сейсмических событиях. Вместе с тем ранее проведенные эксперименты [17] показывают недостатки данного метода:

- при центральном нагружении (1.в) формируется нехарактерные для реальных конструкций разрушения – расслоение кладки в опорной зоне, разрушение угла образца по механизму смятия кладки и т.п.;
- при горизонтальном нагружении с двух сторон (домкраты передают «толкающее» действие) после образования трещин в образце возникает сложность с синхронизацией усилий в гидравлических домкратах;
- в целом, наблюдается большой разброс значений в схожих экспериментах (в рамках общей серии образцов), что не позволяет в полной мере проводить полноценный анализ результатов.

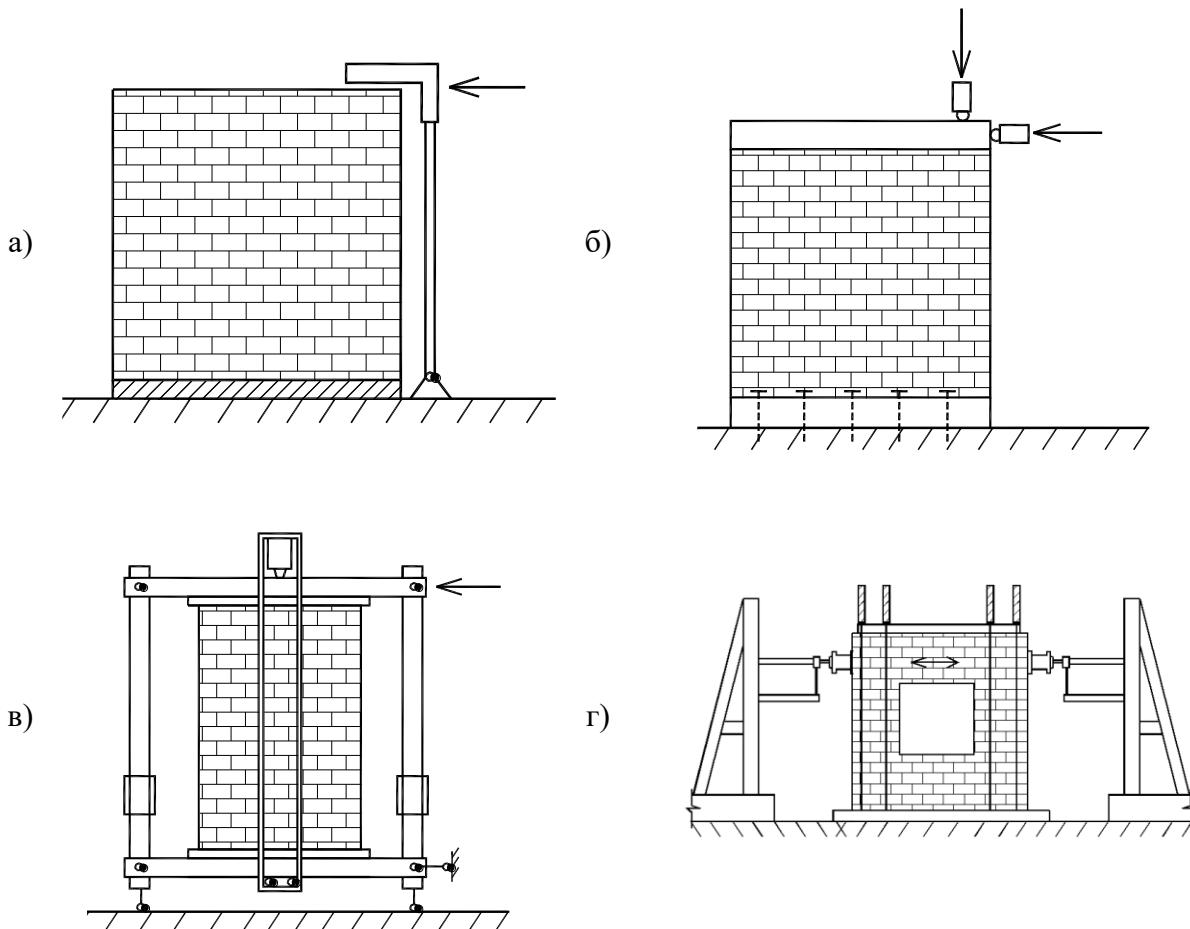


Рисунок 1 - Схемы основных методов испытания натурных фрагментов каменной кладки

2. Модели и методы

С учетом вышеизложенного ни одна из ранее рассмотренных схем не является однозначно предпочтительной при планировании экспериментальных исследований работы образцов из каменной кладки, усиленной различными способами.

Вместе с тем можно выделить схемы испытаний на главные растягивающие напряжения (рис. 2) и схему 1.г. Первую с учетом хорошей сходимости результатов по однородным сериям, а также хорошей сходимостью с численным моделированием на основе накопленного опыта. Для второй (1.д) при определенной модернизации и устранении ранее выявленных недочетов можно добиться хорошей сходимости и максимального приближения напряженно деформированного состояния простенков к реальным зданиям.

Испытания по схеме на рис. 2 хорошо изучены [12-16], для них проработаны механизмы как статических, так и динамических испытаний. В общем виде для кладки толщиной 250 мм

подобраны размеры опорных устройств (опорные уголки с размером 150x150 мм), а также размер образца (близкий к 1050x1050 мм). В общем виде схема представлена на рис. 2.

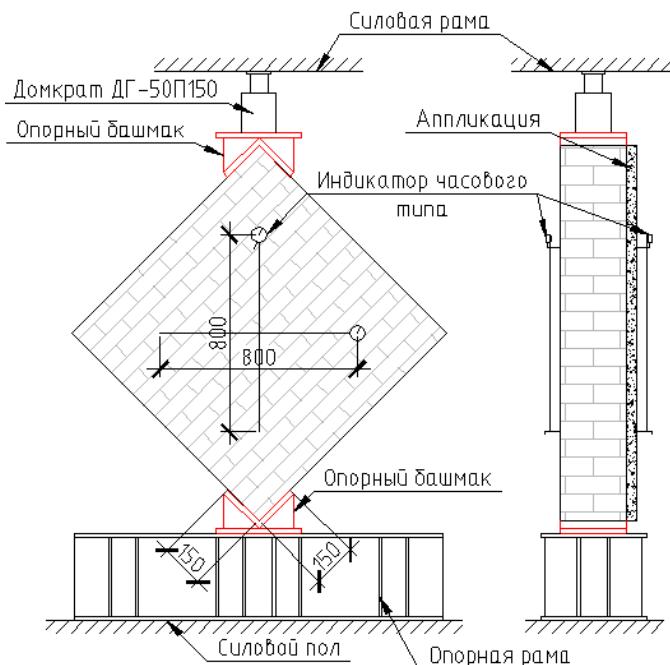


Рисунок 2 - Испытания по схеме 1.б

Нагрузка прикладывается вдоль одной из диагоналей, что формирует при нагружении образование главных напряжений – сжимающих и растягивающих, направленных по диагонали образца.

Указанная схема хорошо отработана на образцах из кладки толщиной 250 мм. При этом вполне закономерно возникают вопросы масштабирования – приведения результатов к наиболее массовым габаритам толщин несущих стен – толщинам 380 и 510 мм.

Для исследования эффективности методов усиления (повышения сейсмостойкости) каменной кладки внешними элементами усиления требования по минимизации эффектов масштабирования являются определяющими. Основание: крайне сложно однозначно трактовать степень влияния односторонней внешней конструкции усиления на повышение несущей способности каменной кладки по критериям восприятия главных растягивающих напряжений. Таким образом, минимальная толщина экспериментальных образцов для исследования эффектов усиления несущих стен из каменной кладки по критериям восприятия главных растягивающих напряжений должна быть не менее 380 мм.

Кроме этого, ранее не проводились испытания восстановленных образцов кладки (фрагменты стен с тарированными дефектами и последующим восстановлением целостности и несущей способности). Образцы с встроенными тарированными повреждениями весьма требовательны к моделированию сложного напряженного состояния конструкции так как наличие встроенных дефектов существенным образом влияет на характеристики напряженного состояния образца. При увеличении толщины образца встроенные дефекты проявляются в возрастающем объеме. Например, пробное моделирование работы экспериментального образца толщиной 380 мм, выполненное авторами по рассматриваемой схеме испытаний, показывает весьма неоднозначные результаты, свидетельствующие о невозможности в полной мере оценить эффекты от восстановления монолитности кладки.

Для прогноза поведения образца из каменной кладки толщиной 380 мм выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния при действии диагонального нагружения (рис. 3).

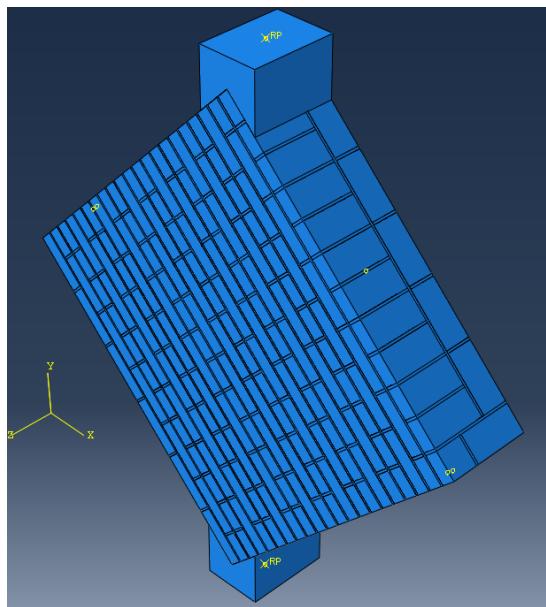


Рисунок 3 - Общий вид конечноэлементной расчетной модели

Расчетная модель сформирована конечными элементами типа «солид», с механическими характеристиками моделируемых материалов, для которых были заданы отдельные диаграммы деформирования для базовых элементов кладки (кирпич и раствор) (рис. 4, 5).

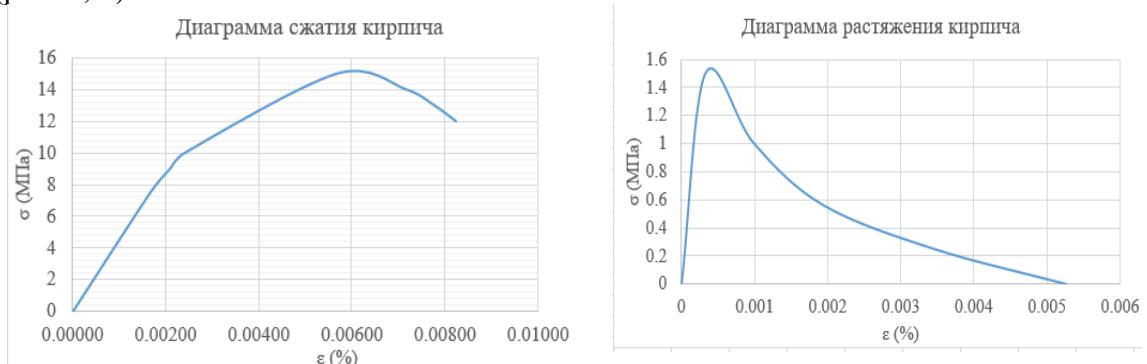


Рисунок 4 - Диаграмма деформирования кирпича М150

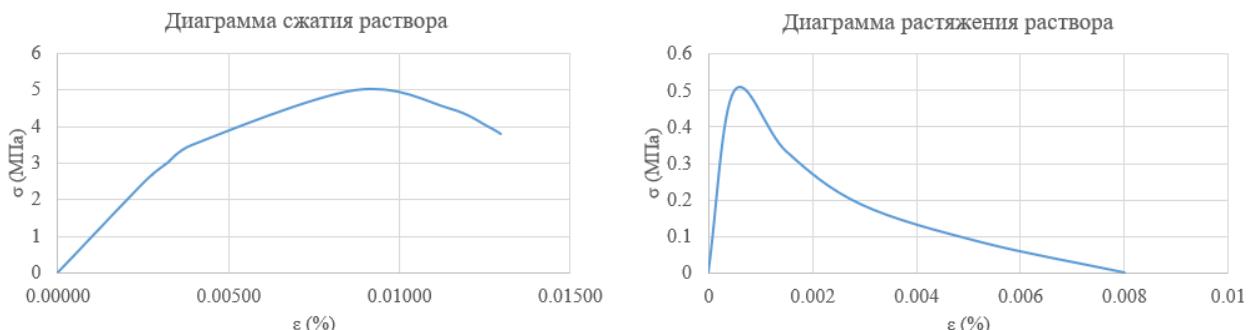


Рисунок 5 - Диаграмма деформирования раствора М50

Для построения диаграмм деформирования материалов кладки были использованы параметры, заложенные в СП 15.13330, а также пособии к СП. Для реальных испытаний конструкций и последующего анализа должны быть проведены испытания каждого из компонентов кладки с целью корректного моделирования.

3. Результаты исследования и их анализ

Результаты численного моделирования представлены на рис. 6.

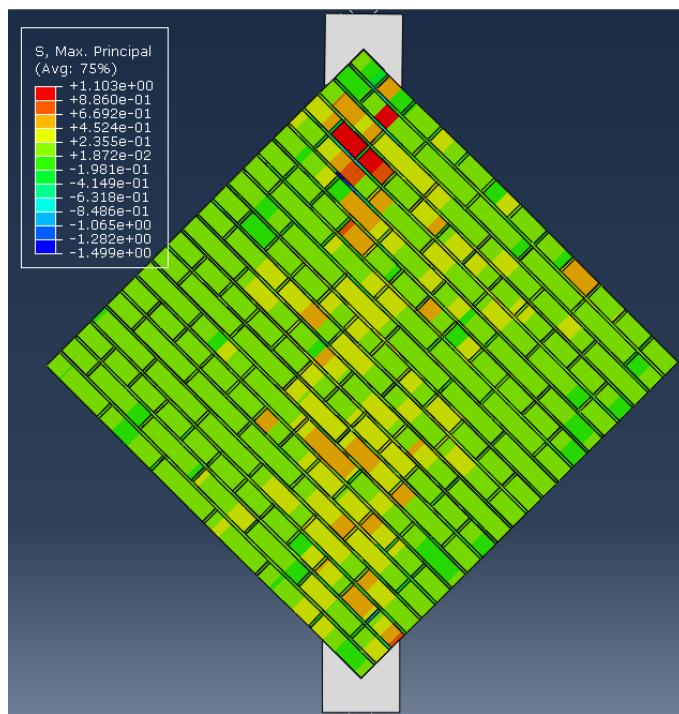


Рисунок 6 - Результаты численного моделирования работы кладки. Мозаика главных напряжений

Как показано в [9], на формирование процессов трещинообразования и разрушения образцов из каменной кладки при действии диагонального нагружения существенное влияние оказывает характеристики взаимодействия базовых материалов (кирпича и раствора), а именно – адгезионная прочность (R_{adh}) взаимодействия по контакту базовых материалов. В численных исследованиях использована величина $R_{adh}=0,128$ МПа, установленная в рамках экспериментальных исследований [9].

Проводя сопоставительный анализ с ранее проведенными исследованиями [15, 16] можно отметить особенности работы фрагмента кладки с толщиной 380 мм:

- значительные напряжения в зоне нагружения образцов, существенно превышающие прочность кладки на смятие;
- наличие трехмерного сложнонапряженного состояния со значительными напряжениями в швах по толще кладки, что может приводить к разрушению образца по механизму расслоения по толщине с разрушением связевых кирпичей.

Численными исследованиями установлено, что при диагональном нагружении образца разрушение формируется по механизму смятия зон кладки, примыкающих к нагрузочным элементам. При толщинах образцов 380 мм и более и при принятых механических характеристиках базовых кладочных материалов разрушение в центральной зоне образца не происходит вследствие демпфирования нагрузления в зонах смятия.

Опыт экспериментальных исследований образцов из каменной кладки [15] показывает, что в ряде случаев разрушение образца происходит по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению» (рис.7).

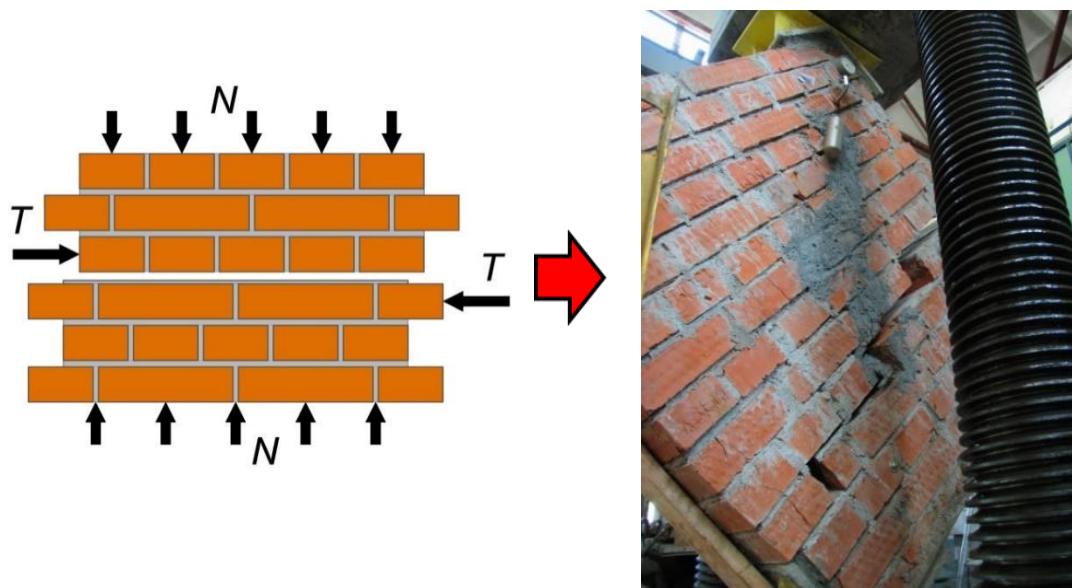


Рисунок 7 - Схема разрушения каменной кладки по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению». Слева – схема механизма разрушения, справа – результат экспериментального исследования образца из каменной кладки при диагональном нагружении [15]

Таким образом, численными исследованиями и анализом имеющихся результатов экспериментальных исследований при диагональном нагружении образцов обоснована необходимость отказа от традиционной схемы испытаний образцов каменной кладки с толщиной 380 мм и более при диагональном нагружении и целесообразность разработки новой методики испытаний образцов с минимизацией эффектов смятия при нагружении и создании условий для реализации механизмов разрушения вследствие действия главных растягивающих напряжений с минимизацией риска разрушения по механизму «сдвиг по неперевязанному сечению».

Учитывая выявленные особенности работы образцов «толстой» кладки (толщиной более 1,5 кирпича – 380 мм) при диагональном нагружении в качестве основной схемы испытаний была выбрана схема на рис. 1.д с рядом усовершенствований. В общем виде схема испытаний представлена на рис. 8 и 9.

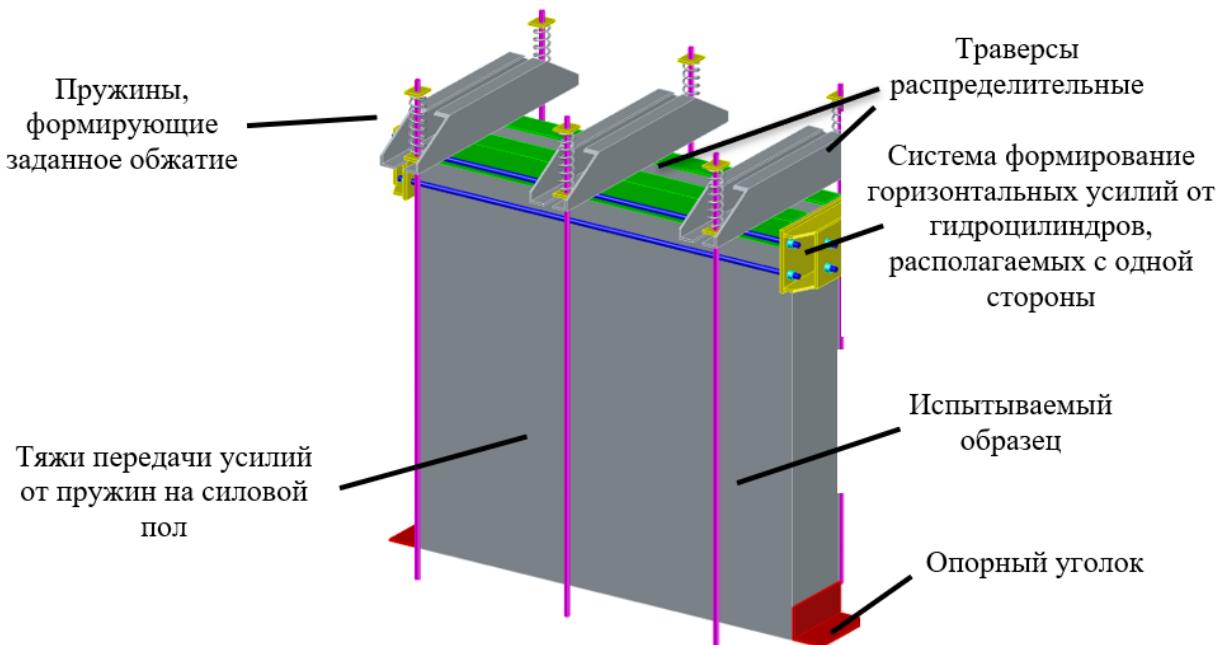


Рисунок 8 - Схема испытательного стенда

Разработанная схема испытаний в наиболее корректном виде моделирует работу каменной кладки простенков зданий при сейсмических воздействиях.

Вертикальные тяжи через пружины и траверсы закрепляют образец к силовому полу. При этом пружинами можно регулировать усилие обжатия образца, моделируя работу простенков различных этажей. Горизонтальное усилие передается через траверсу с формированием обжатия верхней части образца. Схема нагружения испытываемого образца представлена на рис. 9.

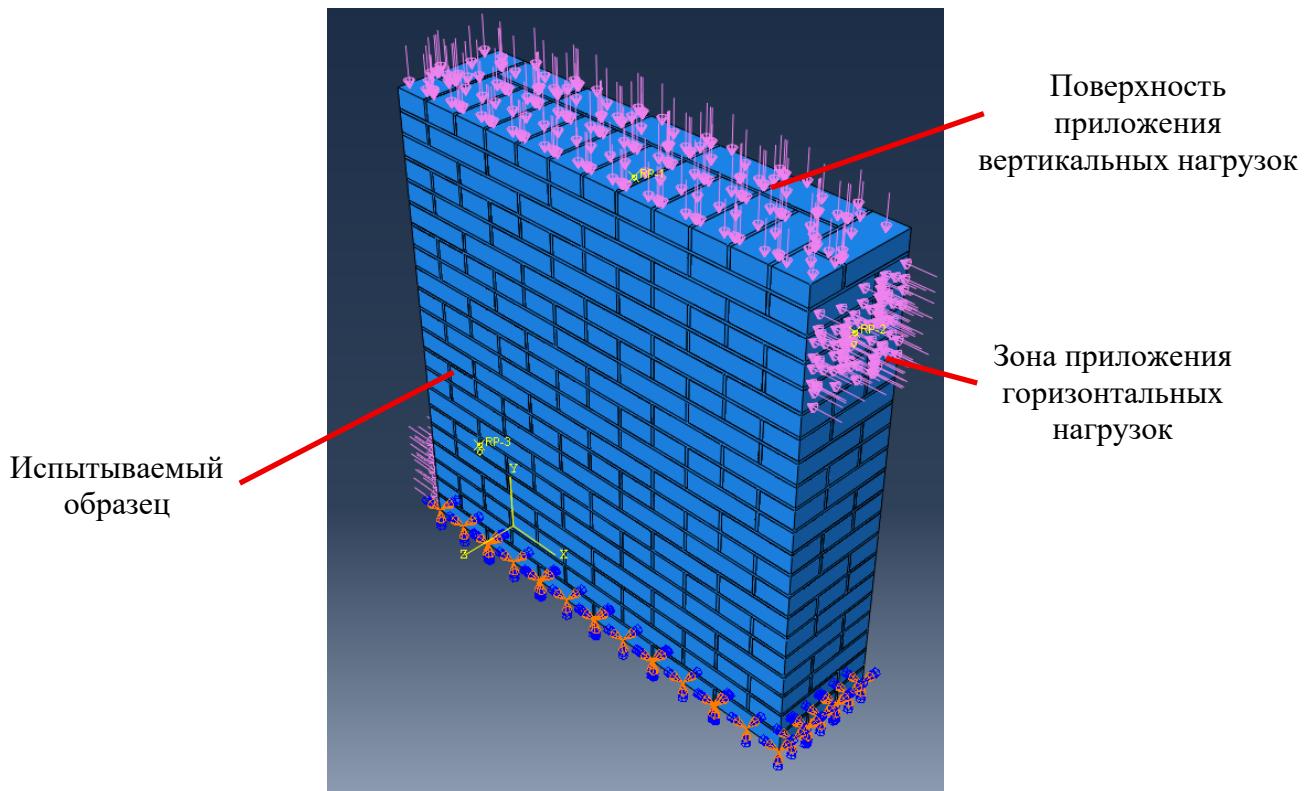


Рисунок 9 - Схема нагружения испытываемого образца

Установка пружин по концам образца, а также обжатие верхней части образца должно исключить полученные в ряде исследований «ошибочные» схемы разрушений (схемы разрушения не характерные для реальных простенков, а также расположенные в неисследуемой области), такие как: разрушение кладки в зоне опорной пятнышки углов образца при перекосе; формирование отрыва по нормальному сцеплению в горизонтальном шве; сдвиг – формирование двух фрагментов с практически горизонтальной площадкой сдвига.

С целью проверки выдвинутых гипотез было выполнено численное исследование работы фрагмента из каменной кладки без усиления (контрольный образец) при базовых характеристиках кладки:

- кирпич пластического формования М150;
- раствор цементно-песчаный М50;
- толщина кладки 380 мм с цепной перевязкой;
- адгезионная прочность (R_{adh}) взаимодействия по контакту базовых материалов

$R_{adh}=0,128$ Мпа.

Мозаика главных напряжений представлена на рис. 10.

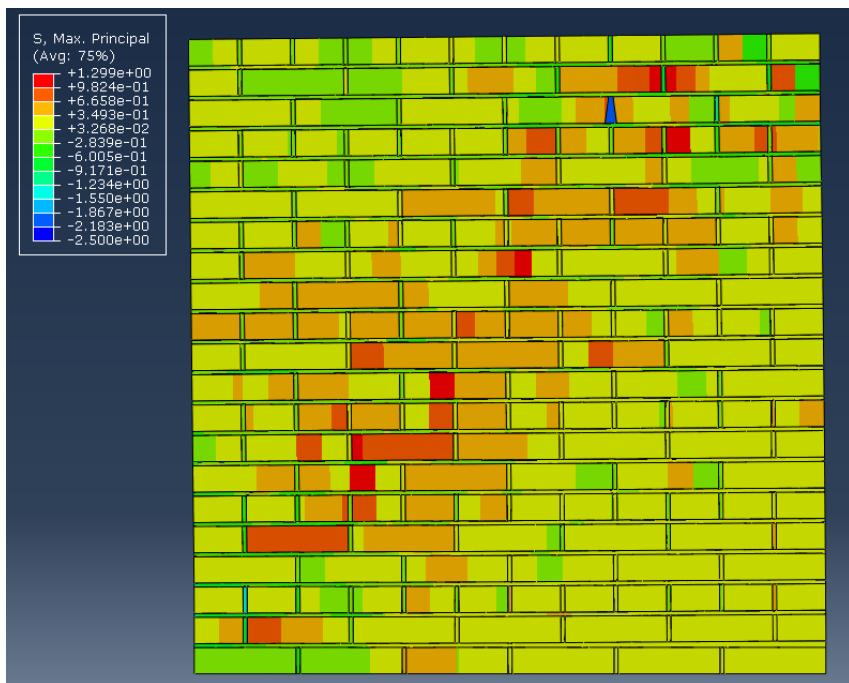


Рисунок 10 - Мозаика главных напряжения, МПа

Сопоставительный анализ со схемой испытания по рис. 1.б показывает ожидаемую картину полей главных напряжений: **большие** напряжения в центральной зоне образца. При этом площадь формирования значимых напряжений относительно равномерно распределяется вдоль главной диагонали – фактически диагонали формирования главных растягивающих напряжений. Таким образом, по результатам численных исследований разработанная методика физического эксперимента для исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из каменной кладки с толщиной образца 380 мм и более может быть признана обоснованной и корректной.

4. Заключение

По результатам анализа схем испытания фрагментов каменной кладки, приведенного в настоящей статье, применяемых для исследований сейсмостойкости и сейсмоусиления каменных конструкций, а также для восстановления каменных конструкций после сейсмических и минно-взрывных воздействий можно сделать следующие выводы:

1. К настоящему времени накоплен значительный опыт испытания образцов каменной кладки с целью повышения сейсмостойкости, восстановления монолитности, что отчасти соответствует поставленным задачам по исследованию вопросов восстановлению конструкций.

2. Существенную сложность представляют вопросы масштабирования результатов испытаний, полученных на образцах кладки толщиной 125 и 250 мм, к толщине каменной конструкции 1,5 кирпича (380 мм) и более. Для минимизации эффектов, вносимых в результаты масштабированием на большие толщины каменных конструкций, рекомендуется проведение испытаний на образцах соответствующей толщины.

3. В качестве основной схемы испытаний усиленных и восстановленных образцов каменной кладки, в том числе оценки вопросов включения в работу элементов усиления из торкрет-бетона, предлагается использовать разработанную схему испытательного стенда, обеспечивающую моделирование вертикальной составляющей нагрузки, равномерно приложенной по граням кладки, и горизонтальной нагрузки, прикладываемой с одной стороны и передающей усилия обратного знака через специальную траверсу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременок П. Л., Измайлов Ю. В. Монолитность и сейсмостойкость конструкций из естественного камня. – Кишинев, 1968. – 202 с.
2. Жунусов Т. Ж. Основы сейсмостойкого строительства. – Алма-Ата, 1990. – 270 сГуревич А. М., Малоглазов Б. И., Рассказовский В. Т. Комплексные конструкции стен со сборно-монолитными сердечниками // Строительство и архитектура Узбекистана. – 1970. – № 2.
3. Гуревич А. М., Малоглазов Б. И., Рассказовский В. Т. Комплексные конструкции стен со сборно-монолитными сердечниками // Строительство и архитектура Узбекистана. – 1970. – № 2.
4. Измайлов Ю. В., Буровенко В. А., Кирпий А. Ф. Усиление зданий, поврежденных землетрясением // Карпатское землетрясение 1986 г. / Под ред. Друмя А.В., Шебалина Н.В., Складнева Н.Н., Графова С.С., Ойзермана В.И. – Кишинев, 1990. – С. 303–317.
5. Кабанцев О. В., Тонких Г. П., Симаков О. А., Симаков А. Б., Баев С. М. Повышение сейсмостойкости каменных конструкций односторонними аппликациями из торкрет-бетона // Аэропорты. Прогрессивные технологии. – 2011. – № 2. – С. 26–32. – EDN: TSQAKV.
6. Кабанцев О. В., Тонких Г. П. и др. Пособие по оценке сейсмостойкости и сейсмоусилению общевойсковых зданий с несущими стенами из каменной кладки. – М.: 26 ЦНИИ МО РФ, 2002.
7. Kabantsev O. V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state // Vestnik of TSUAB. – 2015. – № 4. – P. 113–134.
8. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Modeling of elastic-plastic deformation of masonry under conditions of biaxial stress state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 87–100.
9. Мальцев А. М. Основы железобетонного строительства. – М.: Транспечать НКПС, 1929. – 62 с.
10. Мартемьянов А. И., Ширин В. В. Способы восстановления зданий и сооружений, поврежденных землетрясением. – М., 1978. – 204 с.
11. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий (основы теории сейсмостойкости). – М., 1983. – 304 с.
12. Поляков С. В., Коноводченко В. И. Прочность и деформации виброкирпичных панелей при перекосе // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М., 1963. – С. 131–148.
13. Поляков С. В., Садыхов З. Г. Прочность и деформации сплошных виброкаменных панелей при перекосе // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М., 1963. – С. 170–183.
14. Поляков С. В., Сафаргалиев С. М. Монолитность каменной кладки. – Алма-Ата, 1991. – 160 с.
15. Симаков О. А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 1 (81). – С. 76–84. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84>.
16. Тонких Г. П., Кабанцев О. В., Симаков О. А., Симаков А. Б., Баев С. М., Панфилов П. С. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 35–42. – EDN: QCWDBZ.
17. ElGawady M. A., Lestuzzi P., Badoux M. Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete // Proc. NZSEE Conference. – New Zeland, 2006.

REFERENCES

1. ElGawady M. A., Lestuzzi P., Badoux M. Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete. *Proc. NZSEE Conference*. 2006.
2. Eremenok P.L., Izmailov Yu.V. Monolitnost i sejsmostojkost konstrukcij iz estestvennogo kamnya [Solidity and earthquake resistance of natural stone structures]. Chisinau, 1968. 202 p. (rus).
3. Gurevich A.M., Maloglazov B.I., Rasskazovsky V.T. Kompleksnye konstrukcii sten so sborno-monolitnymi serdechnikami [Complex wall structures with prefabricated monolithic cores]. *Construction and architecture of Uzbekistan*. 1970. No. 2. Pp. ... (rus).
4. Izmailov Yu.V., Burovenco V.A., Kirpiy A.F. Usilenie zdanij, povrezhdennyyh zemletryaseniem [Reinforcement of buildings damaged by the earthquake]. The Carpathian earthquake of 1986. Ed. Drumia A.V., Shebalina N.V., Skladneva N.N., Grafova S.S., Oizerman V.I. Chisinau, 1990. Pp. 303-317. (rus).
5. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Modeling of elastic-plastic deformation of masonry under conditions of biaxial stress state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Vol. 11. Iss. 3. Pp. 87–100. (rus).
6. Kabantsev O.V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state. *Vestnik of TSUAB*. 2015. No. 4. Pp. 113–134. (rus).
7. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M. Povyshenie sejsmostojkosti kamennyh konstrukcij odnostoronnimi applikaciyami iz torkret-betona [Increasing the seismic resistance of stone structures by single-sided applications of shotcrete]. *Airports. Advanced technologies*. 2011. No. 2. Pp. 26-32. (rus).
8. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P. et al. The Grant according to seismic stability and to seismo-strengthening the general armies buildings with bearing walls from a stone laying. Moscow, 26 TSNII MO the Russian Federation, 2002.

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

9. Malcev A.M. Osnovy zhelezobetonnogo stroitelstva [Fundamentals of reinforced concrete construction]. Moscow: Transpechat NKPS, 1929. (rus).
10. Martemyanov A.I., Shirin V.V. Sposoby vosstanovleniya zdanij i sooruzhenij, povrezhdennyh zemletryaseniem [Methods of restoring buildings and structures damaged by an earthquake]. Moscow, 1978. 204 p. (rus).
11. Polyakov S.V. Sejsmostojkie konstrukcii zdanij (osnovy teorii sejsmostojkosti) [Earthquake-resistant structures of buildings (fundamentals of the theory of seismic resistance)]. Moscow, 1983. 304 p. (rus).
12. Polyakov S.V., Konovodchenko V.I. Strength and deformation of vibro-brick panels during skewing. Earthquake resistance of prefabricated large-element buildings. Moscow, 1963. Pp. 131-148.
13. Polyakov S.V., Sadykhov Z.G. Prochnost i deformacii sploshnyh vibro-kamennyh panelej pri perekose [Strength and deformation of continuous vibrating wall panels during skewing]. Earthquake resistance of prefabricated large-element buildings. Moscow, 1963. Pp. 170-183. (rus).
14. Polyakov S.V., Safargaliev S.M. Monolitnost kamennoj kladki [Monolithic masonry]. Alma Ata, 1991. 160 p. (rus).
15. Simakov O.A. Analysis of factors causing the need for strengthening of reinforced concrete constructions. *Building and Reconstruction*. 2019. No. 1(81). Pp. 76-84. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84> (rus).
16. Tonikh G.P., Kabantsev O.V., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M., Panfilov P.S. Eksperimentalnye issledovaniya sejsmousileniya kamennoj kladki naruzhnymi betonnymi applikaciyami [Experimental studies of seismic reinforcement of masonry by external concrete applications]. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2011. No. 2. Pp. 35-42. (rus).
17. Zhunusov T.J. Osnovy sejsmostojkogo stroitelstva [Fundamentals of earthquake-resistant construction]. Alma Ata, 1990. 270 p. (rus).

Информация об авторе:

Кабанцев Олег Васильевич

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры Железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: ovk53@mail.ru

Симаков Олег Александрович

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры Железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: simakov-ne@mail.ru

Ле Во Фу Тоан

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,
аспирант кафедры Железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: hskdtoan@gmail.com

Information about author:

Kabantsev Oleg V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: ovk53@mail.ru

Simakov Oleg A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: simakov-ne@mail.ru

Le Vo Phu Toan

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: hskdtoan@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.10.2025

Одобрена после рецензирования 09.11.2025

Принята к публикации 13.11.2025

The article was submitted 01.10.2025

Approved after reviewing 09.11.2025

Accepted for publication 13.11.2025

ВЛ. И. КОЛЧУНОВ^{1,2}

¹Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ), г. Москва, Россия

«ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ» В МЕХАНИКЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Аннотация. В статье рассмотрен новый инструментарий для построения расчетных моделей сопротивления железобетона построенный на понятии «представительного объема» для моделирования характерных сложно напряженных зон конструкции. В основу инструментария положена идея блочных физических моделей сопротивления и сочетание энергетического подхода механики разрушения железобетона с трещинами и деформационных моделей теории железобетона. Для определения жесткости и трещиностойкости железобетонных стержневых элементов в зонах совместного действия моментов и поперечных сил предложена модель «единичной составной полоски» в поперечных сечениях элемента с наклонными трещинами. Раскрытие нормальных и наклонных трещин моделируется «представительным объемом» в виде армированной призмы и двухконсольным элементом (ДКЭ). Напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины определяется с учетом открытого автором в механике разрушения железобетона деформационного эффекта.

Ключевые слова: железобетон, представительный объем, деформационный эффект, гипотезы, двухконсольный элемент, механика разрушения, раскрытие - закрытие трещин, жесткость.

VL. I. KOLCHUNOV^{1,2}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

²Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF), Moscow, Russia

REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT IN THE MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE

Abstract. The article presents a novel computational framework for developing constitutive models of reinforced concrete (RC) behavior, based on the concept of a Representative Volume Element (RVE) for simulating characteristic complex stress states in structural members. The framework is founded on the idea of block-based physical models of material response, combining the energy approach of fracture mechanics for cracked RC with deformation models of reinforced concrete theory. To determine the stiffness and crack resistance of RC members in regions subjected to combined bending moments and shear forces, a "single composite strip" model within cross-sections containing inclined cracks is proposed. The opening of normal and inclined cracks is simulated using RVEs represented by a reinforced prism and a double-cantilever element (DCE), respectively. The stress-strain state in the vicinity of a crack is determined taking into account a deformation effect in the fracture mechanics of RC, discovered by the author.

Keywords: reinforced concrete, representative volume element (RVE), deformation effect, hypotheses, double-cantilever element (DCE), fracture mechanics, crack opening-closing, stiffness.

1. Введение

Получившие широкое применение модели железобетона, основанные на использовании метода конечных элементов и реализуемые в универсальных программных комплексах, далеко не всегда адекватно отражают реальное деформирование железобетонных конструкций с учетом новых физических явлений, установленных экспериментально с использованием нового инструментария исследований. В этой связи, развитие аналитических методов расчета железобетонных конструкций является не только важным направлением для наглядного качественного анализа напряженного состояния в конструкциях при различных внешних воздействиях, но и для учета новых, устанавливаемых экспериментально физических явлений в теории железобетона.

За последние два десятилетия произошло значительное развитие применяемых в практике проектирования аналитических моделей теории железобетона. К одним из известных в этом направлении можно отнести расчетные модели, предложенные В.М. Бондаренко и Вл.И. Колчуновым [1], А.Б. Голышевым [2,3], Н.И. Карпенко [4], С.Н. Карпенко [5], основанные на всестороннем анализе экспериментально установленных новых физических явлений и теоретического поведения железобетонных конструкций при различных видах напряженного состояния. В развитие этих моделей в работах [5-8] и в экспериментально-теоретических исследованиях Баширова Х.З., Федорова В.С. [9], Яковенко И.А. [10], Демьянова А.И. [11] и др., на полученных ими достаточно представительных экспериментальных данных для железобетонных конструкций сплошного и составного сечений при различных видах напряженного состояния (в том числе и таких сложных и мало изученных, как изгиб с кручением), получены новые, более строгие расчетные зависимости для определения параметров предельных состояний первой и второй группы – прочности, ширины раскрытия трещин и жесткости в железобетонных конструкциях.

Уместно отметить и ряд других эффективных расчетных моделей аналитического характера, разработанных в последнее время как российскими (О.Г. Кумпяк, Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. [12, 13], Митасова В.М., Коянкин А.А. [14, 15], Адищев В.В. [15], Алексеевцева А.В. [16]), так и зарубежными учеными [17-21], которые также основываются на экспериментально выявленных новых физических явлениях в силовом сопротивлении сложнонапряженных железобетонных конструкций при статических и динамических нагрузлениях.

Анализ приведенных и других исследований в области разработки и применения физических и расчетных моделей сопротивления железобетона позволяет прийти к выводу о том, что в перспективе одним из направлений совершенствования и развития теории железобетона может стать разработка полуаналитических моделей теории железобетона как комбинация аналитических – максимально учитывающих установленные физические явления и численных – позволяющих обеспечивать расчет конструкций различной сложности. В связи с этим *целью рассматриваемой статьи* явилось создание нового инструментария для построения расчетных моделей сопротивления железобетона базирующегося на понятии «представительного объема» для моделирования характерных сложно напряженных зон железобетонных конструкций и обоснование принципов, обеспечивающих реализацию этого инструментария.

2. Модели и методы

Предлагаемый инструментарий основывается на идее создания блочных физических моделей сопротивления железобетона в сочетании с энергетическим подходом механики разрушения и деформационных моделей теории железобетона. При построении расчетных моделей рассматриваемый инструментарий строится на использовании ряда сформулированных автором принципов базовых принципов механики железобетона [4, 25] и направленных на сближение расчетных моделей и физических процессов деформирования железобетона выявляемых экспериментально.

В расчетных моделях сопротивления используется установленный автором деформационный эффект в механике разрушения железобетона, физическая суть которого заключается в дополнительном деформационном воздействии реакции арматуры и бетона в форме эллипсоида профиля трещины, связанной с нарушением сплошности бетона [1–6, 25].

Для определения жесткости железобетонных элементов с трещинами и определения ширины раскрытия трещин используется так называемый двухконсольный элемент (ДКЭ) [26], связывающий функционалом традиционные параметры нелинейного деформирования железобетона и параметры механики разрушения. Определение расчетных параметров (ДКЭ) производится по скорости высвобождения потенциальной энергии и дополнительной работы тела при продвижении трещины. Уместно отметить, что в научных исследованиях российских и зарубежных ученых при оценке ширины раскрытия трещин использовались разные предложения по форме берегов трещины - от треугольного профиля до формы эллипса или формы «рыбки» [17-21, 24 и др.]. Однако функциональная связь формы профиля трещины с физической сущностью явления в виде деформационного эффекта была установлена автором более 20 лет назад [1, 2] и развита в докторских диссертациях учеников И.А. Яковенко [10] и А.И. Демьянова [11].

Для определения средних деформаций арматуры ($\varepsilon_{s,m}$) и, соответственно, кривизны и жесткости железобетонного элемента в сечении сложнонапряженной зоны совместного действия момента и поперечной силы используется модель «единичной составной полоски». Зона со сложным напряженным состоянием, например зона совместного действия поперечной силы и изгибающего момента (рисунок 1), после образования наклонных трещин моделируется рядом единичных полосок и рассматривается как составная пластина, имеющая сдвиги между полосками. Такая модель позволяет достаточно строго учитывать раскрытие наклонных трещин в рассматриваемой зоне и их влияние на перемещения (прогибы) элемента.

Действующие российские и зарубежные нормы по проектированию железобетонных конструкций используют понятие средних деформаций арматуры ($\varepsilon_{s,m}$) и зависимость для кривизны элемента в сечении с трещиной вида:

$$1/r = f(\varepsilon_{b,m}; \varepsilon_{s,m}; \psi_s; l_{crc}).. \quad (1)$$

В соответствии с такой моделью значения ширины раскрытия трещин на уровне оси арматуры нормами значительно завышаются. Учет в расчетных моделях сопротивления железобетона (PMC) деформационного эффекта и двухконсольного элемента, как показали выполненные исследования [23, 24], позволяет не только сблизить опытные и расчетные параметры деформирования железобетона, но и адекватно объяснить физические процессы образования, раскрытия трещин и изменения расстояний между трещинами на разных уровнях нагружения элемента. Модель раскрытия - закрытия трещин в железобетонной конструкции с различными видами напряженного состояния описывает физический процесс реакции арматурного стержня в зоне стягивающейся бетонной матрицы в растянутой зоне железобетонного элемента.

Согласно описанному процессу раскрытия трещин различных типов на различных участках напряженного состояния конструкции общая уровневая модель для анализа железобетонных стержневых систем строится расчленением их на подконструкции второго уровня [4]. Для отдельных элементов конструкции декомпозиция выполняется выделением представительного объема в зоне с характерным напряженным состоянием (см. рисунок 1) : зона изгибного напряженного состояния $M > M_{crc}$, $Q < Q_{crc}$ (ДКЭ1); зона сдвига с изгибом $M > M_{crc}$; $Q \geq Q_{crc}$; (ДКЭ2), зона участка с пространственными трещинами при кручении с изгибом (ДКЭ3) и другие зоны с характерным напряженным состоянием и соответствующим типом трещин.

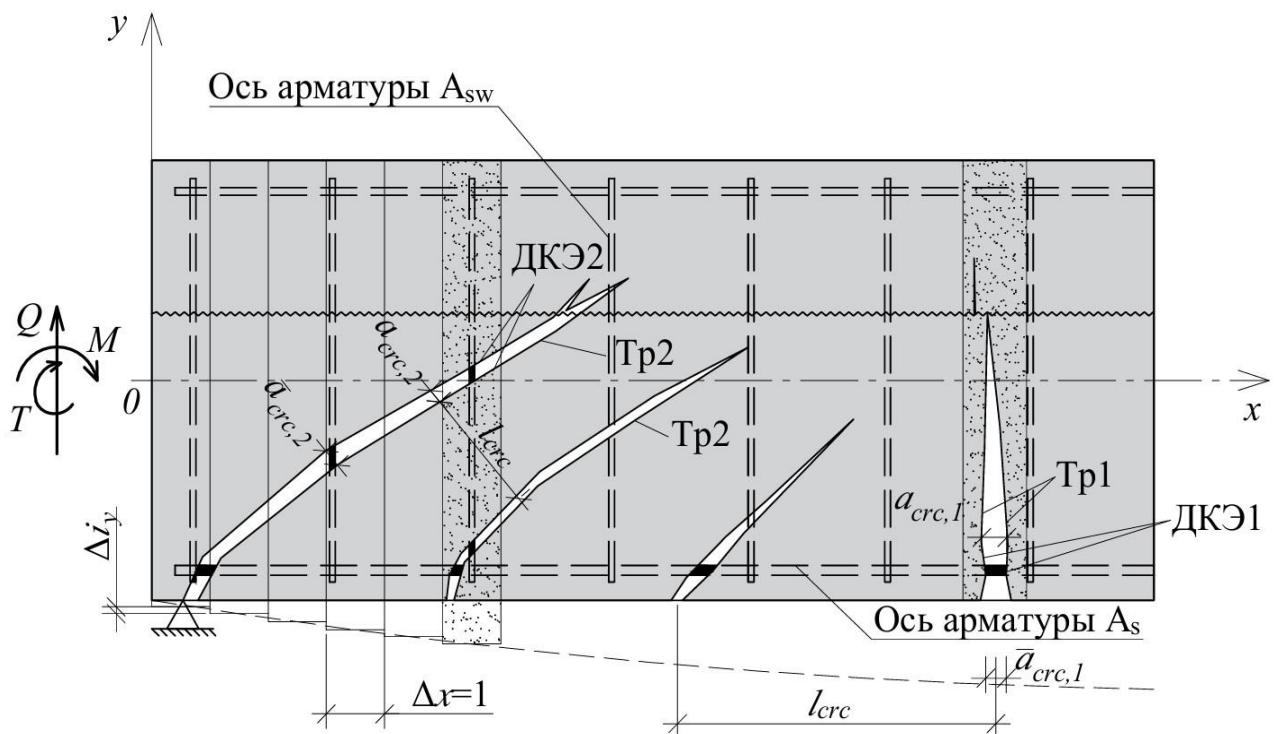


Рисунок 1 — Схема трещин в характерных зонах стержневого железобетонного элемента в общем случае нагружения изгибающим и крутящим моментами и поперечной силой и схема его декомпозиции на зоны с различным напряженным состоянием

Согласно физическому процессу раскрытия трещины с учетом деформационного эффекта, последовательно рассматривая эпюру усилий (деформаций) в сечении с неизвестными ΔT_i (силы сцепления), $\Delta T_{\gamma,i}$ (сдвигающей силы) и $\sigma_{bt,i}$ (сжимающие напряжения) в двухконсольном элементе ДКЭ 1, прилегающем к берегам трещины определяются напряженно-деформированное состояние в ДКЭ 1.

Параметры раскрытия берегов нормальной трещины (параметры ДКЭ) определяются на энергетической основе из следующего функционала:

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \left(P^2 \frac{\partial C}{\partial A} - CP \frac{\partial P}{\partial A} \right). \quad (2)$$

Здесь обозначены δV – уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на малое приращение δa ; δW – дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на малое приращение δa от ряда усилий, приложенных к двухконсольному элементу (схема усилий, приложенных к ДКЭ приведена на рис. 2).

Аналогичным образом строится расчетная модель для представительного объема-призмы ДКЭ 2 в зоне сложного напряженного состояния – сдвига с изгибом ($M > M_{crc}$; $Q \geq Q_{crc}$). Схема усилий, геометрические и статические параметры этой модели показаны на рисунке За, б). Раскрытие и закрытия трещин определяется здесь через направляющие косинусы l , m , n для перемещений, связанных с отрывом, поперечным сдвигом и поворотом осей в расчетном сечении в трещине. В результате для двухконсольных элементов в выделенных полосах,

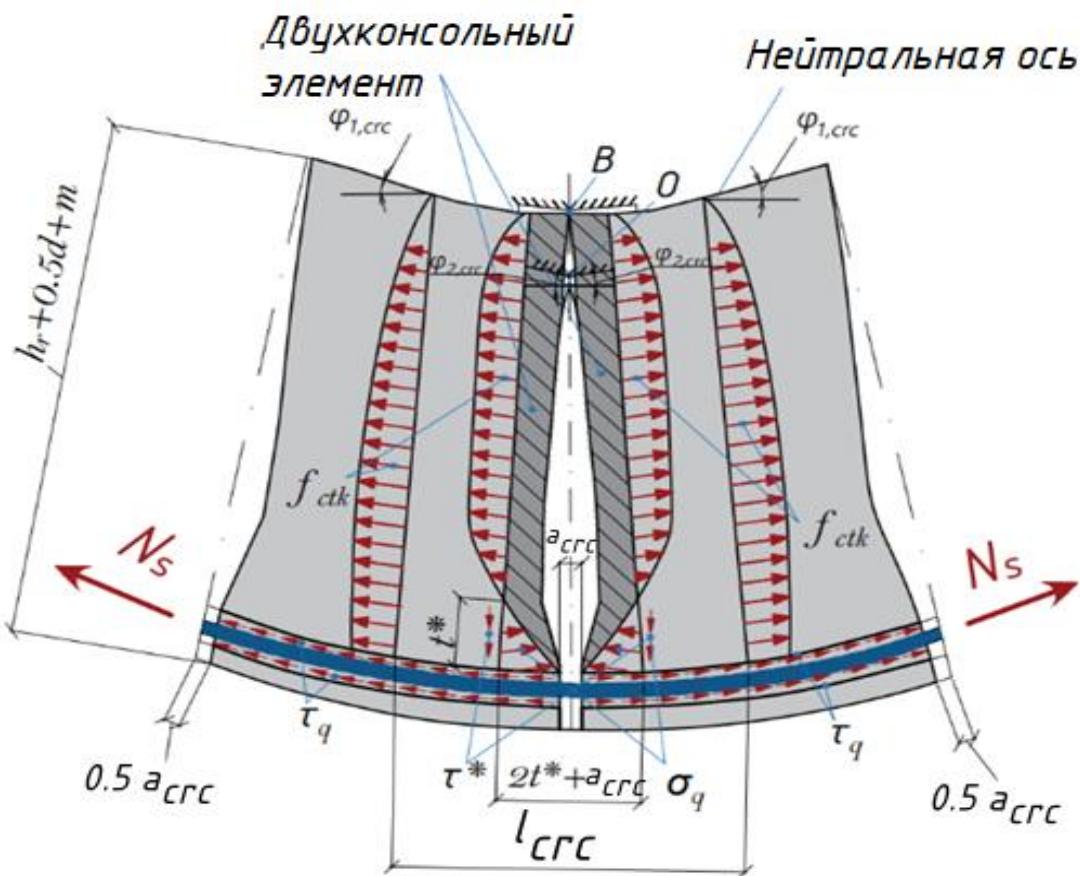


Рисунок 2 – Представительный объём - схема двухконсольного элемента ДКЭ 1 в зоне изгибного напряженного состояния элемента: $M > M_{crc}$, $Q < Q_{crc}$

пересекаемых трещинами в сложнонапряженной зоне, мы получим параметры жесткости, результирующие смещения полосок друг относительно друга и деформированную картину составного элемента с трещинами в рассматриваемой зоне.

Деформации армированного представительного объема в направлении i -той оси определяются соотношением:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \mu_V}. \quad (3)$$

Здесь E_s - модуль упругости арматуры; μ_V – коэффициент объемного армирования в направлении i - той оси.

Перемещения i -го направления в трещине u_{gi} (см. рисунок 3в) можно определить в функции от деформаций арматуры $\varepsilon_{s,i}$ и бетона $\varepsilon_{b,i}$ на участках между трещинами l_{crc} :

$$u_{gi} = (\varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{b,i}) \cdot l_{crc,i} = (\varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{b,i}) \cdot \frac{0.5l_{crc}}{\sin(\alpha+\beta)}. \quad (4)$$

Здесь, значение расстояния между трещинами $l_{crc,i}$ на участках между трещинами, следуя [4] :

$$l_{crc} = \frac{2 \cdot (ln B_4 - B \cdot t_*)}{-B}, \quad (5)$$

где B_4, B_3, B_2 и B - параметры, учитывающие влияние нарушения сплошности бетона, геометрические характеристики сечения, а также сцепление арматуры с бетоном, определяются по формулам [27].

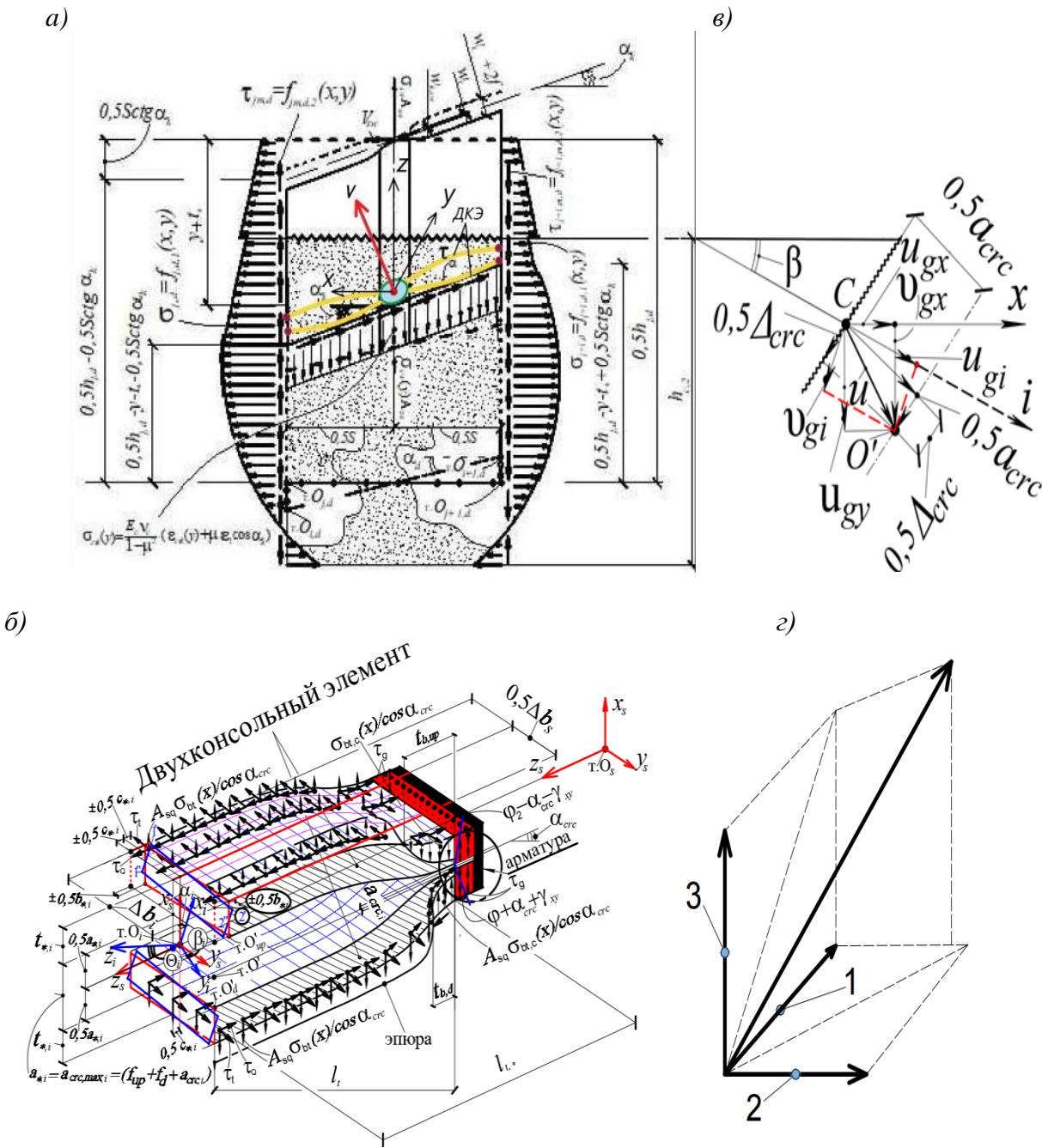


Рисунок 3 – Модель - «Представительный объем» - призма-ДКЭ 2 для плоского напряженного состояния в составном стержневом элементе в зоне сдвига с изгибом $M > M_{crc}$; $Q \geq Q_{crc}$ (а) и для объемного напряженного состояния $M > M_{crc}$; $T > T_{crc}$; $Q \geq Q_{crc}$ (б) и главные векторы перемещений в трещине (\vec{U}_{ndc}) (в) и армирования \vec{C}_a (г) 1 - поперечная арматура из плоскости элемента, 2 - продольная арматура, 3 - поперечная арматура в плоскости элемента

Взаимно ортогональные перемещения i -го направления в трещине u_{gi}, v_{gi} , связаны между собой раскрытием берегов трещины a_{crc} и сдвигом в трещине Δ_{crc}

$$0.5 \cdot a_{crc} = u_{gy} \cdot \cos \alpha + u_{gx} \cdot \sin \alpha \quad (i \neq x, z) \quad (6)$$

$$0.5 \cdot \Delta_{crc} = u_{gy} \cdot \sin \alpha - u_{gx} \cdot \cos \alpha \quad (i \neq x, z) \quad (7)$$

Для косинуса угла β главного вектора объемного армирования \vec{C}_a рабочей арматуры связанного с нормальными напряжениями $\sigma_{s,i}$ арматуры в трещинах и касательными напряжениями $\tau_{s,i}$ и с величинами перемещений u_{gi}, v_{gi} , получено (рисунок 3e):

$$\cos \beta = 0,5A_\beta \pm \sqrt{(0,5A_\beta)^2 - B_\beta}. \quad (8)$$

Здесь $A_\beta = 2 \cdot v_{gi} \cdot u_{gz} / (u_{gx}^2 + u_{gz}^2)$; $B_\beta = (v_{gi}^2 - u_{gx}^2) / (u_{gx}^2 + u_{gz}^2)$.

В итоге из зависимостей (4) и (7) и (8) имеем:

$$u_{gi} = u_{gx} \cdot \cos \beta_i + u_{gy} \cdot \sin \beta, \quad (9)$$

Перемещение i -го направления в трещине u_{gi} может быть найдено по формуле (3) а расстояния между трещинами $l_{crc,i}$ - по формуле (4). Поэтому вычислить параметр u_{gi} в формулах (8) - (9) можно сразу без дополнительных итераций.

В качестве примера для наклонных трещин (Тр2). с раскрытием a_{crc} и сдвигом берегов Δ_{crc} трещин, для перемещений в трещине, с учетом податливости бетона и направления главного вектора \vec{C} рабочего армирования (формула 8) можно записать:

$$\begin{aligned} U_s &= 0.5a_{crc} \sin \theta - 0.5\Delta_s \cos \theta \\ V_s &= 0.5a_{crc} \cos \theta + 0.5\Delta_s \sin \theta \end{aligned}, \quad (10)$$

Связи между v_{gi} и углом β опираясь на экспериментальные данные [2, 6, 27] имеют вид:

$$v_{gi} = k_{sup} \cdot R_{sup} = k_{sup} (Q_s + N_s \cdot \tan \beta + P_i) \cdot \eta \quad (11)$$

Здесь k_{sup} - функция податливости стержней сдвига для участка расстояния l_{crc} на некотором малом отрезке перемещений u_{gi} и v_{gi} ; η - коэффициент для обобщенной опорной реакции R_{sup} сложнонапряженного конструктивного элемента.

Из связанных между собой параметров перемещений u_{gi} , v_{gi} , соотношений между направляющим косинусом и весами арматуры соответствующего направления (в общем случае поперечной арматуры в плоскости из плоскости элемента) с учетом их классов и площадей (θ_x , θ_y , θ_z) из геометрических соотношений можно записать:

$$\beta(u_{gx}, u_{gz})^2 + \theta(u_{gx}, u_{gy})^2 + \zeta_{bu}(u_{gy}, u_{gz})^2 = 1, \quad (12)$$

где ζ_{bu} - удельная поверхность образования трещины, вычисляемая из условия (2).

Таким образом зависимость (12) определяет прямую и обратную связь перемещений стержней арматуры u_{gi} и v_{gi} с раскрытием a_{crc} и сдвигом берегов Δ_{crc} трещины через составляющие главного вектора армирования \vec{C} и расстояние между трещинами l_{crc} .

В соответствии с рассмотренным инструментарием и вытекающими из него моделями деформирования железобетона сопротивление растянутого бетона в изотропной среде передается на арматуру через общий параметр В.И. Мурашева (ψ_s или $\psi_{s,sw}$) для среднего продольного усилия N_{sm} :

$$N_{s,m} = \varepsilon_s \cdot \psi_s \cdot E_s \cdot A_s = N_s \cdot \psi_s; \quad (13)$$

И, соответственно, среднего поперечного усилия $Q_{s,m}$ ($Q_{s,m} = \varepsilon_s \cdot \psi_{Q,s} \cdot E_s \cdot A_s$). Другими словами можно говорить о установленной рассматриваемой моделью строительной механики железобетона связи для среднего суммарного усилия $N_{s,m,sum}$ рабочей арматуры» через деформационный эффект и «нагельный» эффект как для стержня арматуры с двумя

защемленными концами при поворотах заделок и действии поперечного усилия $Q_{s,m}$, раскрытии $a_{crc,s}$ и сдвиге Δ_{crc} берегов трещины.

3. Результаты исследования и их анализ

В результате проведенного исследования был разработан и теоретически обоснован новый инструментарий для построения расчетных моделей сопротивления (PMC) железобетонных конструкций, основанный на концепции «представительного объема» (Representative Volume Element, RVE). Ключевым результатом является создание полуаналитического подхода, который комбинирует физическую наглядность аналитических методов с вычислительными возможностями численного моделирования для анализа сложнонапряженных зон.

Основным элементом предложенного инструментария стала модель двухконсольного элемента (ДКЭ), которая применяется в качестве представительного объема для моделирования зон с трещинами. Для зоны чистого изгиба ($M > M_{crc}$, $Q < Q_{crc}$) использован ДКЭ 1 (Рисунок 2), а для сложно напряженной зоны - сдвига с изгибом ($M > M_{crc}$, $Q \geq Q_{crc}$) – пространственная модель «призма-ДКЭ 2» (Рисунок 3). Анализ показал, что данные модели позволяют с высокой точностью описывать напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины, учитывая как кинематику раскрытия (нормальные и сдвиговые перемещения), так и силовое взаимодействие арматуры с бетоном.

Важнейшим результатом является учет деформационного эффекта, физическая суть которого заключается в дополнительном деформационном воздействии реакции арматуры и бетона в области эллипсоида профиля трещины. Анализ демонстрирует, что учет этого эффекта в рамках ДКЭ позволяет установить функциональную связь между формой профиля трещины и физической сущностью явления, что ранее не учитывалось в других известных моделях (треугольный профиль, «рыбка» и пр.). Это приводит к значительному сближению расчетных и экспериментальных данных по ширине раскрытия трещин и деформациям.

Для расчета жесткости и деформаций в зонах совместного действия моментов и поперечных сил предложена модель «единичной составной полоски». Анализ работы этой модели показал, что она позволяет учесть взаимное смещение полосок, вызванное раскрытием наклонных трещин, и получить результирующую картину деформирования составного элемента. Это обеспечивает более точное определение кривизны и прогибов по сравнению с нормативными методами.

На основе энергетического подхода (функционал ζ_{bu} , формула 2) получены расчетные зависимости для определения параметров трещин: ширины раскрытия, сдвига берегов и расстояния между трещинами. Анализ формул (4-7, 10-12) показывает, что предложенная система уравнений устанавливает прямую и обратную связь между перемещениями арматуры, раскрытием трещин и геометрией армирования через главный вектор C^* . Это позволяет избежать трудоемких итерационных процедур при расчете.

Сравнительный анализ с экспериментальными данными, полученными в работах [23, 24], подтвердил адекватность предложенных моделей. В частности, модель ДКЭ адекватно описывает физические процессы образования, раскрытия-закрытия трещин и изменения расстояний между ними на разных уровнях нагружения, включая сложные случаи пространственного напряженного состояния.

Таким образом, анализ результатов подтверждает, что разработанный инструментарий на основе представительных объемов (ДКЭ) и деформационного эффекта позволяет создавать более строгие и физически обоснованные PMC. Они не только повышают точность расчетов по деформациям и трещиностойкости, но и открывают новые возможности для качественного анализа работы железобетона в сложнонапряженных условиях, что является перспективным направлением для совершенствования норм проектирования.

4. Заключение

1. Предложен универсальный инструментарий для разработки расчетных моделей сопротивления (PMC) железобетонных конструкций основанный на анализе

экспериментально установленных новых физических явлений поведения железобетонных конструкций при различных видах напряженного состояния в основу которого положен на энергетический подход к механике разрушения железобетона и использование для моделирования представительного объема в различных зонах напряженного состояния конструкции.

2. Определение жесткости сечений, ширины раскрытия трещин, расстояния между трещинами для сложнонапряженных зон железобетонных элементов с наклонными или пространственными трещинами от совместного действия силовых факторов выполняется с использованием модели единичной составной полоски , «представительного объема» плоского или пространственного двухконсольного элемента (ДКЭ) моделирующего в деформационный эффект в трещине с использованием гипотезы Томаса – Автора.

3. Определение ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами производится с использованием модели двухконсольного элемента в сочетании с представительным объемом - «призма-двуихконсольный элемент».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.
2. Гольышев А.Б., Колчунов Вл.И. Сопротивление железобетона. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
3. Гольышев А.Б., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях: монография. – К.: Талком, 2015. – 371 с.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 410 с.
5. Карпенко С.Н. О построении общего расчета железобетонных плоских конструкций в конечных приращениях // Бетон и железобетон. – 2005. – № 3. – С. 22–26.
6. Колчунов Вл.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2023. – Т. 19. – № 3. – С. 261–275.
7. Kolchunov VI. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending // Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2021. – Cham: Springer, 2022. – (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 287). – P. 79–97.
8. Savin S., Fedorova N., Korenkov P. Experimental Investigation of RC Frame with Sway Columns Under Corner Column Removal Scenario // Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2022. – Cham: Springer, 2023. – (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 372). – P. 291–313.
9. Федоров В.С., Баширов Х.З., Колчунов Вл.И. Элементы теории расчета железобетонных составных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 116–118.
10. Iakovenko I., Kolchunov VI. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – Vol. 15. – № 3. – P. 366–375. – DOI 10.5937/jaes15-14662.
11. Dem'yanov A.I., Salnikov A.S. The estimation of spatial cracks formation in reinforced concrete structures under the action torsion with bending // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 365. – № 5. – P. 052019.
12. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Влияние распора на прочность железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 1 (769). – С. 5–16. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-769-1-5-16.
13. Kumpyak O., Galyautdinov Z., Galyautdinov D., Rakimova T. Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 170. – P. 303–312. – DOI 10.1007/978-3-030-79983-0_28.
14. Коянкин А.А., Митасов В.М. Расчет сборно-монолитного изгибающегося элемента по деформациям и трещиностойкости // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (65). – С. 48–54. – DOI 10.52170/1815-9265_2023_65_48.
15. Митасов В.М., Адищев В.В. О применении энергетических соотношений в теории сопротивления железобетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 4. – С. 33–37.
16. Алексейцев А.В. Поиск рациональных параметров строительных конструкций на основе многокритериальной эволюционной оптимизации // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 9. – С. 45–50.

17. Rahal K.N. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants // ACI Structural Journal. – 2007. – Vol. 104. – № 4. – P. 402–411.
18. Rahal K.N. Torsional strength of normal and high strength reinforced concrete beams // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – P. 2206–2216.
19. Faron A., Rombach G.A. Simulation of crack growth in reinforced concrete beams using extended finite element method // Engineering Failure Analysis. – 2020. – Vol. 116. – P. 104698.
20. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // Buildings. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 533. – DOI 10.3390/buildings13020533.
21. Rahal K.N. A unified approach to shear and torsion in reinforced concrete // Structural Engineering and Mechanics. – 2021. – Vol. 77. – № 5. – P. 691–703. – DOI 10.12989/sem.2021.77.5.691.
22. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – № 9. – С. 99–109.
23. Thomas F.G. Cracking in reinforced concrete // The Structural Engineer. – 1936. – Vol. 14. – № 8. – P. 298–320.
24. Tan E.L., Varsani H., Liao F. Experimental study on demountable steel-concrete connectors subjected to combined shear and tension // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 183. – P. 110–123.
25. Колчунов Вл.И. Модель расчета параметров предельных состояний железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 2 (118). – С. 4–13. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-118-2-4-13.
26. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Y., Moskovtseva V.S. Analytical Model of Crack Opening in Reinforced Concrete Structures Based on DCE // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 12. – P. 2096. – DOI 10.3390/buildings15122096.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov VI.I. *Raschetnyye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [Calculation Models of Reinforced Concrete Strength Resistance]. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 472 p. (In Russian).
2. Golyshev A.B., Kolchunov VI.I. *Soprotivleniye zhelezobetona* [Resistance of Reinforced Concrete]. Kyiv: Osnova, 2009. 432 p. (In Russian).
3. Golyshev A.B., Kolchunov VI.I., Yakovenko I.A. *Soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruktsiy, zdaniy i sooruzheniy, vozvodimykh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah* [Resistance of Reinforced Concrete Structures, Buildings and Constructions Erected in Complex Engineering-Geological Conditions: Monograph]. Kyiv: Talkom, 2015. 371 p. (In Russian).
4. Karpenko N.I. *Obshchiye modeli mehaniki zhelezobetona* [General Models of Reinforced Concrete Mechanics]. Moscow: Stroyizdat, 1996. 410 p. (In Russian).
5. Karpenko S.N. O postroyenii obshchego rascheta zhelezobetonnykh ploskikh konstruktsiy v konechnykh prirashcheniyakh [On the Construction of a General Calculation of Reinforced Concrete Plane Structures in Finite Increments]. *Beton i Zhelezobeton*, 2005, no. 3, pp. 22–26. (In Russian).
6. Kolchunov VI.I. Metod raschetnykh modeley soprotivleniya dlya zhelezobetona [The Method of Calculation Models of Resistance for Reinforced Concrete]. *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 261–275. (In Russian).
7. Kolchunov VI. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending. *Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2021*. Cham: Springer, 2022. (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 287), pp. 79–97.
8. Savin S., Fedorova N., Korenkov P. Experimental Investigation of RC Frame with Sway Columns Under Corner Column Removal Scenario. *Modern Problems in Construction: Selected Papers from MPC 2022*. Cham: Springer, 2023. (Lecture Notes in Civil Engineering; Vol. 372), pp. 291–313.
9. Fedorov V.S., Bashirov Kh.Z., Kolchunov VI.I. Elementy teorii rascheta zhelezobetonnykh sostavnykh konstruktsiy [Elements of the Theory of Calculation of Reinforced Concrete Composite Structures]. Academia. Arkhitektura i Stroitel'stvo, 2014, no. 2, pp. 116–118. (In Russian).
10. Iakovenko I., Kolchunov VI. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 366–375. DOI: 10.5937/jaes15-14662.
11. Dem'yanov A.I., Salnikov A.S. The estimation of spatial cracks formation in reinforced concrete structures under the action torsion with bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365, no. 5, p. 052019.
12. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Vliyaniye raspory na prochnost' zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskem nagruzhenii [Influence of Thrust on the Strength of Reinforced Concrete Beams on Flexible Supports Under Short-Term Dynamic Loading]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2023, no. 1 (769), pp. 5–16. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-769-1-5-16. (In Russian).

13. Kumpyak O., Galyautdinov Z., Galyautdinov D., Rakhimova T. Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 170, pp. 303–312. DOI: 10.1007/978-3-030-79983-0_28.
14. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Raschet sborno-monolitnogo izgibayemogo elementa po deformatsiyam i treshchinostoykosti [Calculation of a Precast-Monolithic Bending Element by Deformations and Crack Resistance]. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*, 2023, no. 2 (65), pp. 48–54. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_65_48. (In Russian).
15. Mitasov V.M., Adishchev V.V. O primeneniil energeticheskikh sootnosheniy v teorii soprotivleniya zhelezobetona [On the Application of Energy Ratios in the Theory of Reinforced Concrete Resistance]. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura*, 1990, no. 4, pp. 33–37. (In Russian).
16. Alexeytsev A.V. Poisk ratsional'nykh parametrov stroitel'nykh konstruktsiy na osnove mnogokriterial'noy evolyutsionnoy optimizatsii [Search for Rational Parameters of Building Structures Based on Multi-Criteria Evolutionary Optimization]. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo*, 2019, no. 9, pp. 45–50. (In Russian).
17. Rahal K.N. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. *ACI Structural Journal*, 2007, vol. 104, no. 4, pp. 402–411.
18. Rahal K.N. Torsional strength of normal and high strength reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 2206–2216.
19. Faron A., Rombach G.A. Simulation of crack growth in reinforced concrete beams using extended finite element method. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 116, p. 104698.
20. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 533. DOI: 10.3390/buildings13020533.
21. Rahal K.N. A unified approach to shear and torsion in reinforced concrete. *Structural Engineering and Mechanics*, 2021, vol. 77, no. 5, pp. 691–703. DOI: 10.12989/sem.2021.77.5.691.
22. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. K raschetu zhelezobetonnykh elementov na izgib s krushcheniem [On the Calculation of Reinforced Concrete Elements for Bending with Torsion]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo*, 2015, no. 9, pp. 99–109. (In Russian).
23. Thomas F.G. Cracking in reinforced concrete. *The Structural Engineer*, 1936, vol. 14, no. 8, pp. 298–320.
24. Tan E.L., Varsani H., Liao F. Experimental study on demountable steel-concrete connectors subjected to combined shear and tension. *Engineering Structures*, 2019, vol. 183, pp. 110–123.
25. Kolchunov V.I. Model' rascheta parametrov predel'nykh sostoyaniy zhelezobetonnykh konstruktsiy [Model for Calculating Limit State Parameters of Reinforced Concrete Structures]. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya*, 2025, no. 2 (118), pp. 4–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-4-13. (In Russian).
26. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Y., Moskovtseva V.S. Analytical Model of Crack Opening in Reinforced Concrete Structures Based on DCE. *Buildings*, 2025, vol. 15, no. 12, p. 2096. DOI: 10.3390/buildings15122096.

Информация об авторах:

Колчунов Владимир Иванович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия, ведущий научный сотрудник. E-mail: vlik52@mail.ru

Information about authors:

Kolchunov Vladimir Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling. Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, leading researcher.

E-mail: vlik52@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025

Одобрена после рецензирования 21.11.2025

Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 18.11.2025

Approved after reviewing 21.11.2025

Accepted for publication 01.12.2025

М.Б. МАРИНИЧЕВ¹, П.А. ЛЯШЕНКО¹, В.В. ДЕНИСЕНКО²

¹ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия

²ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия

МЕХАНИЗМ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА ПРИ КОМПРЕССИОННОМ СЖАТИИ ПРОБЫ

Аннотация. Деформации пробы глинистого грунта являются следствием сдвигов по поверхностям скольжения. Фронт поверхности скольжения, перемещаясь в нагружаемом грунтовом теле, тормозится на деформационных неоднородностях. Преодоление упругого сопротивления на них происходит со скачком перемещения. Перемещения на группе деформационных неоднородностей кооперативно проявляются в виде скачка осадки пробы грунта при компрессионном сжатии. Деформационные неоднородности представлены, в рамках 2-х компонентной модели деформации, наиболее крупными жёсткими включениями в матрице глинистых частиц и микроагрегатов. Показаны схематично связь перемещения поверхности скольжения с деформациями сжатия пробы, механизм скачкообразности осадки и цикличности скорости осадки. Эффект скачкообразности осадки проявляется как при нагружении пробы, так и при ползучести. Преодоление вязкого трения в глинистой матрице и упругого сопротивления на деформационных неоднородностях вызывает отклонение физической поверхности скольжения от поверхности максимальных касательных напряжений, что создаёт эффект внутреннего трения.

Ключевые слова: деформационная неоднородность, деформация, напряжение, поверхность скольжения, микроагрегат, скорость деформации, ползучесть, скачок скорости.

M.B. MARINICHEV¹, P.A. LYASHENKO¹, V.V. DENISENKO²

¹Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

DETERMINATION OF SOIL CREEP DEFORMATIONS

Abstract. Deformations of a clay soil sample are a consequence of shearing along sliding surfaces. The sliding surface front, moving in the loaded soil body, is slowed down by deformation heterogeneities. Overcoming the elastic resistance on them occurs with a displacement jump. Displacements on a group of deformation heterogeneities cooperatively manifest themselves in the form of a jump in the soil sample's settlement under compression. Deformational heterogeneities are represented, within the framework of a 2-component deformation model, by the largest rigid inclusions in the matrix of clay particles and microaggregates. The schematic diagram shows the relationship between the displacement of the sliding surface and the compression deformations of the sample, as well as the mechanism of stepwise settlement and the cyclicity of the settlement rate. The effect of stepwise settlement is observed both during the loading of the sample and during creep. Overcoming viscous friction in the clay matrix and elastic resistance on deformation heterogeneities causes the physical sliding surface to deviate from the surface of maximum tangential stresses, which creates the effect of internal friction.

Keywords: deformation heterogeneities, deformation, stress, sliding surface, microaggregate, settlement rate, creep, velocity jump.

1. Введение

Компрессионное сжатие является распространённым способом испытания грунта для определения его деформационных характеристик. Описание деформаций опирается на представление о грунте как сплошной однородной среде, а компрессионное сжатие рассматривается как изотропное. Зависимость деформации пробы от давления на неё описывается обычно гладкой кривой, не отражающей дисперсный характер грунта.

Однако грунты представляют собой «рыхлые горные породы... несвязные или связные, прочность связей которых во много раз меньше прочности самих минеральных частиц» [1, 2]. Взаимодействие частиц осуществляется посредством контактов между ними [2-7].

Опыт с одноплоскостным сдвигом образца глинистого грунта с постоянной скоростью деформации и непрерывной записью сопротивления позволил увидеть колебания значений последнего [8]. Г.И. Покровский связал колебания реакции с перестройкой микроструктуры грунта и предлагал определять «эффективный диаметр частиц» по амплитуде колебаний, используя их статистическую оценку.

Лабораторные исследования ползучести при сдвиге показали, что её скорость изменяется довольно резко. Это явление было описано Г.И. Тер-Степаняном (1973, 1976, 1988) и объяснено перестройкой микроструктуры грунта: «кривые ползучести в фазе разрушения состоят из кусков парабол; в момент перестройки структуры процесс пересекает от одной возможной параболы на другую, её пересекающую» [9-11].

Эти наблюдения отражают проявление в грунтах «эффекта Портевена-Ле Шателье» (ЭПЛ) – скачкообразного изменения реакции пробы материала при плавном его нагружении [12, 13]. Объяснение ЭПЛ в грунтах возможно только на микроструктурном уровне. К этому есть несколько соображений. «Структурная перестройка вызвана обратимым (а иногда и необратимым) изменением взаимного положения и ориентации частиц пористого тела» [14-16]. «В процессе сдвиговых деформаций отдельные элементы и их группы могут совершать как поступательное, так и вращательное движение» [17-19]. «...в многофазном глинистом грунте происходят два взаимно компенсирующих явления: упрочнение, обусловленное заливанием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнение, вызванное переориентацией частиц, а также образованием и развитием микротрещин и макротрещин» [20, 21].

Все перечисленные явления присутствуют в процессе компрессионного сжатия, так как в нём возникают сдвиговые деформации, приводящие, в общем, к изменению объёма пробы [2, 22, 23]. При этом деформация сжатия пробы увеличивается скачкообразно при плавном нагружении и при ползучести после его окончания, т. е. наблюдается ЭПЛ.

В настоящей статье поставлена задача объяснения механизма ЭПЛ с использованием микроструктурной модели деформаций грунта.

Задача решается на основе:

1) устойчиво наблюдаемом скачкообразном увеличении деформации пробы грунта при росте давления с постоянной скоростью и непрерывной записи осадки пробы как при нагружении, так и при постоянном давлении;

2) представления об определяющей роли сдвиговых деформаций грунта в сопротивлении и деформациях пробы;

3) измерений параметров скачков сопротивления и деформаций пробы при компрессионном испытании методом ПВН.

2. Модели и методы

Для примера рассмотрим деформации пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры при компрессионном сжатии и ползучести при конечном давлении. Площадь торца пробы 60 см^2 , высота пробы 25 мм.

Испытание пробы при компрессионном сжатии производилось в режиме постоянно возрастающей нагрузки (ПВН). Осевое давление на торце пробы создавалось гирей, движущейся по рычагу с заданной скоростью, и вычислялось по формуле:

$$\sigma = B_p t_p, \quad (1)$$

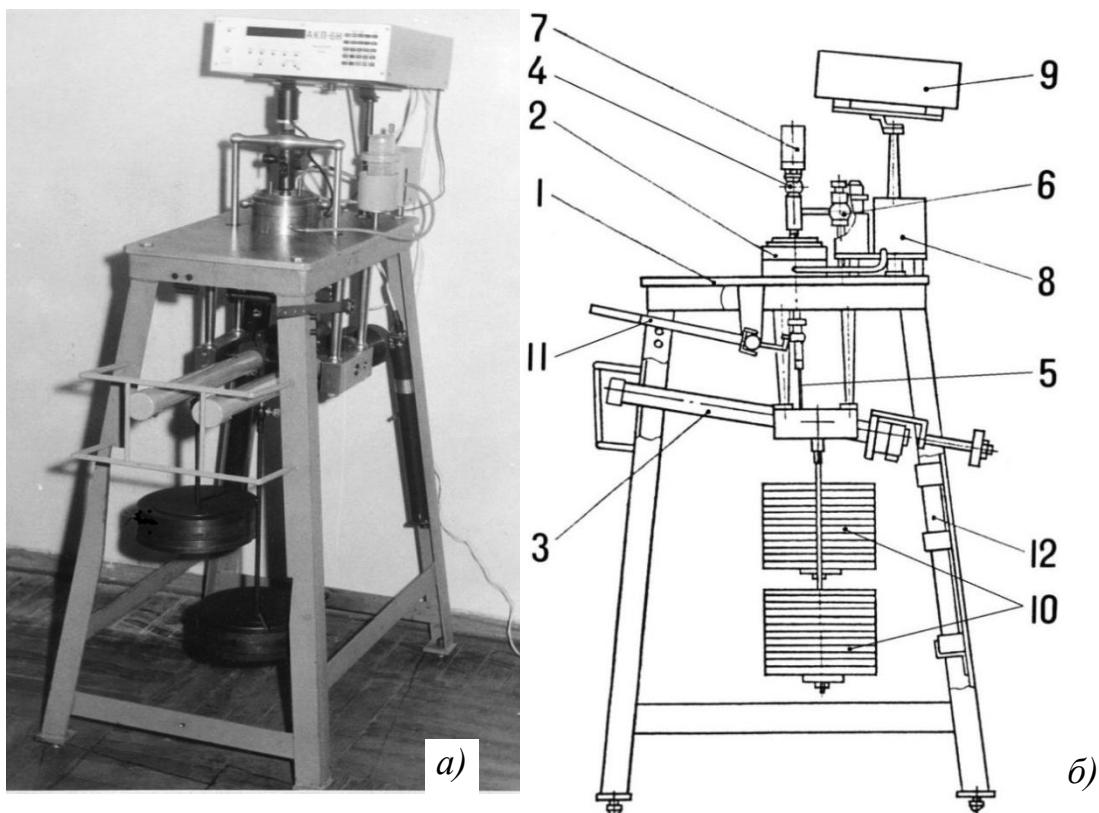
где B_p – скорость увеличения осевого давления на пробу;

t_p – время с начала нагружения.

Значение $B_p = 40$ кПа/ч поддерживалось постоянным с коэффициентом вариации 0,191.

Нагружение гирей через рычаг с плечом переменной длины создаёт условия гравитационного статического нагружения пробы, подобные условиям нагружения грунта в основании строящегося сооружения. Осадка s пробы измерялась непрерывно и регистрировалась с шагом $\Delta s_p = 0,005$ мм.

Испытание пробы производилось на автоматизированном компрессионном приборе с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н (рисунок 1), обеспечивающем плавное приложение постоянно возрастающей нагрузки, статическое действие и постоянство приложенной нагрузки независимо от величины осадки образца грунта, что в наибольшей степени моделирует условия работы грунтовых оснований при строительстве [24].



1 – стол-основание; 2 – одометр; 3 – нагруженный механизм; 4 – нагруженная рамка; 5 – гибкая тяга;
6 – реперная стойка; 7 – измеритель осадки штампа; 8 – устройство для замачивания грунта;
9 – блок управления; 10 – грузы постоянной массы; 11 – устройство для подъема нагруженной рамки;
12 – блок резервного питания

Рисунок 1 – Автоматический компрессионный прибор с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н:
а) – внешний вид; б) – общий вид

График " $s_p - \sigma_p$ " показывает неравномерное увеличение осадки (рисунок 2, а). График скорости осадки " $f_p - \sigma_p$ " имеет циклический характер (рисунок 2, б).

$$f_p = \bar{s}_p / \Delta t_p, \quad (2)$$

где Δt_p – интервал времени, за который осадка изменилась на величину \bar{s}_p .

Испытание той же пробы на ползучесть производилось при конечном значении давления $\sigma_{end} = 55$ кПа. После нагружения наблюдение за осадкой ползучести при постоянном давлении продолжалось еще 15,25 часа до стабилизации скорости осадки. Осадка ползучести s_{crp} пробы измерялась непрерывно и регистрировалась с шагом $\bar{\Delta}s_{crp} = 0,005$ мм.

График " $s_{crp} - t_{crp}$ " показывает неравномерное увеличение осадки ползучести (рисунок 3, а). График скорости осадки " $f_{crp} - t_{crp}$ " имеет циклический характер (рисунок 3, б).

$$f_{crp} = \bar{\Delta}s_{crp}/\Delta t_{crp}, \quad (3)$$

где Δt_{crp} – интервал времени, за который осадка изменилась на величину $\bar{\Delta}s_{crp}$.

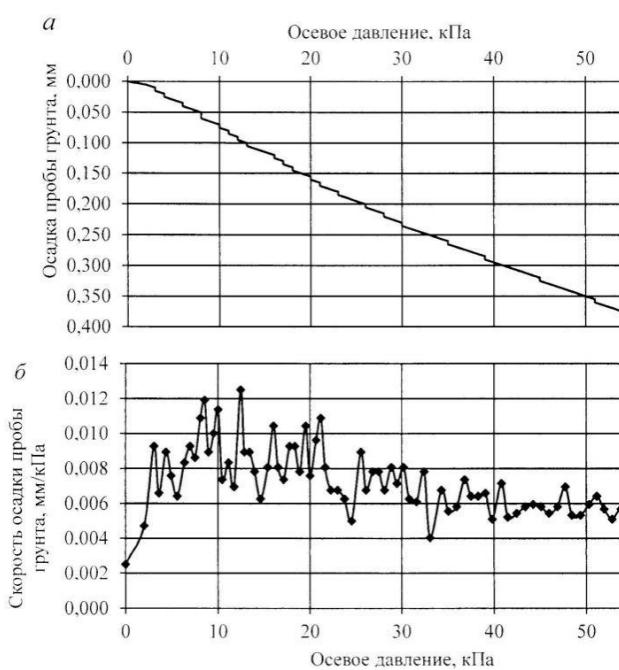


Рисунок 2 – Графики при нагружении пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры:
а) – осадки; б) – скорости осадки

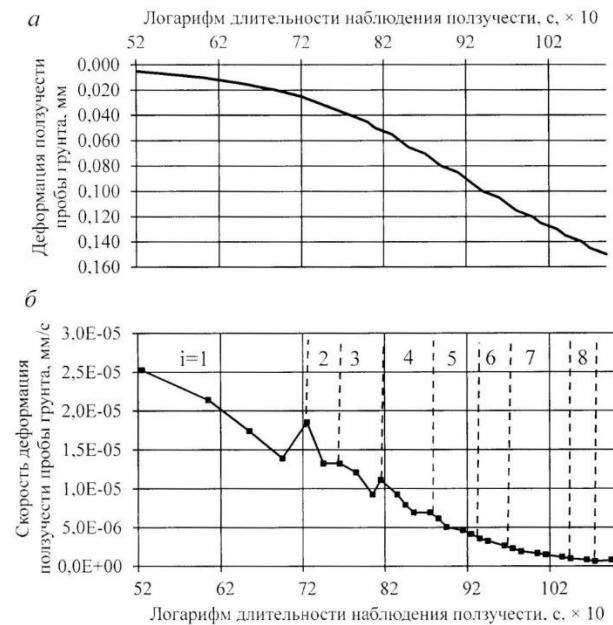
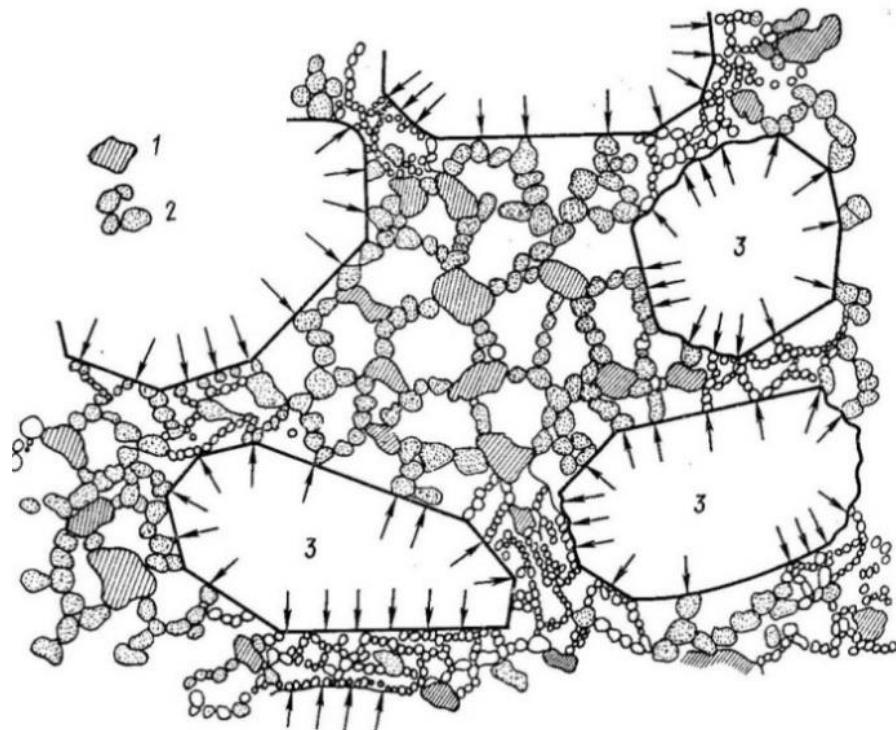


Рисунок 3 – Графики пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры:
а) – осадки; б) – скорости деформации ползучести

Влияние деформационной неоднородности грунта на пластические деформации грунтового тела

Данные испытания с ПВН наглядно показывают скачкообразное увеличение осадки и, соответственно, циклический характер скорости осадки – как при плавном увеличении давления, так и при его постоянном значении. Это – следствие «сыпучести» и неоднородности грунта, являющимися его неотъемлемыми свойствами. Неоднородность выражена, в основном, различиями в размерах твёрдых элементов грунта и характеризуется гранулометрическим составом [2, 4, 6, 7]. Микротекстура глинистых грунтов хорошо изучена (рисунок 4) и может служить отправной позицией для объяснения механизма деформаций.

Распределение внутренних деформаций и усилий в грунтовом теле от внешней нагрузки происходит посредством контактов между элементами микроструктуры [4, 6, 7]. Известно, что «при компрессионном сжатии одновременно с объемными деформациями развиваются и сдвиговые деформации...» [23]. Обычно сдвиговые деформации не измеряются при компрессионном сжатии пробы грунта и не учитываются при расчётах осадки основания фундамента. Но именно на них влияет деформационная неоднородность.



*Рисунок 4 – Модель микротекстуры глинистого грунта по А. Казагранде [2]:
1 – микроагрегаты глинистых частиц; 2 – песчаные и пылеватые зерна*

Суть этого влияния в том, что на контактах крупных жёстких частиц (песчаных и пылевых) с массой мелких (глинистых частиц и их микроагрегатов) возникают площадки сдвиговых деформаций, развивающиеся в поверхности скольжения, перемещения по которым доступны измерениям.

Деформационная неоднородность только частично порождается гранулометрической неоднородностью, но не тождественна ей, так как не является присущим грунту свойством, а определяется, в числе многих факторов, условиями разрушения при нагружении грунтового тела.

Примем микроструктурную модель деформаций грунта в виде 2-х компонентной среды, состоящей из матрицы глинистых частиц и их микроагрегатов (МА), в которую погружены наиболее крупные зёрна (НКЗ) неглинистых минералов. При нагружении грунтового тела на контактах матрицы с НКЗ концентрируются напряжения. Они разрушают матрицу, образуя в ней площадки сдвига (ПлС) вблизи НКЗ. НКЗ, имея намного большую жёсткость, играют роль «затравки» разрушения матрицы сдвигом на своих гранях.

ПлС образуются одновременно на фронте поверхности максимальных касательных напряжений $\Omega(\tau_{max} = const)$, когда τ_{max} достигнут предела сдвиговой прочности глинистой матрицы $\tau_{lim.m}$ вблизи группы НКЗ с одинаковыми напряженно-деформированными условиями. ПлС объединяются в поверхность скольжения (ПС), в результате кооперативной реакции группы ПлС на внешнюю нагрузку. Момент образования ПС регистрируется на границе грунтового тела со штампом прибора, как скачок деформации сжатия. ПС начинается от этой границы, как от жёсткого тела, и продолжается в глинистой матрице на поверхности $\Omega(\tau_{max} = \tau_{lim.o})$ (рисунок 5), где $\tau_{lim.o}$ – предел сдвиговой прочности глинистой матрицы между НКЗ: $\tau_{lim.o} < \tau_{lim.m}$.

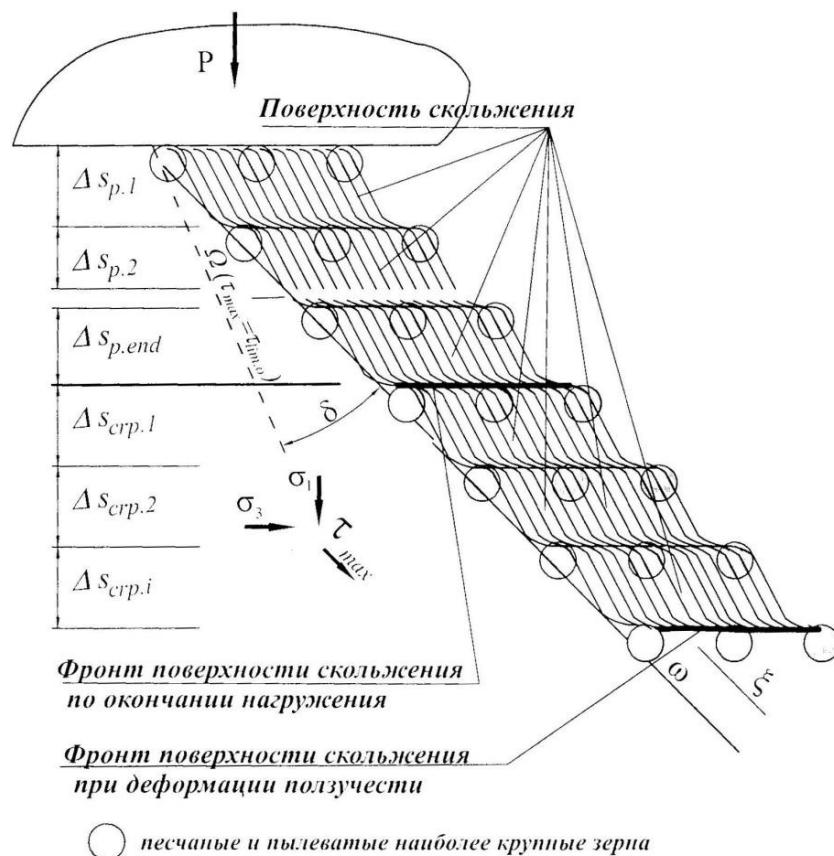


Рисунок 5 – Схема формирования поверхности скольжения на деформационных неоднородностях и приращений осадки на каждом шаге перемещения её фронта

Развитие ПС происходит в направлении, задаваемом вектором $\vec{\xi} = -\text{grad } \{\tau_{max}(x,y,z)\}$. Фронт ПС перемещается под действием неуравновешенного касательного напряжения:

$$\Delta\tau_p = \tau_{max} - \tau_{lim}, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_p$ и τ_{max} – неуравновешенная часть и максимальное касательное напряжение на ПС, соответственно; τ_{lim} – обобщённая сдвиговая прочность 2-х компонентной среды.

Шаг перемещений фронта ПС определяется размерами включений и расстояниями между ними, а скорость – скоростью увеличения τ_{max} , т. е. величиной B_p . Измеренные приращения осадки пробы являются проекцией на ось пробы перемещения ПС при кооперативном сдвиге на группе ПлС. Значения приращений осадки Δs_p и Δs_{crp} соответствуют циклам скорости деформации (ЦД) на графике " $f_p - \sigma_p$ ".

Сопротивление грунта на поверхности скольжения при нагружении пробы

На каждом шаге матрица МА оказывает вязкое сопротивление сдвигу на поверхности Ω между группами НКЗ и упругое – на контакте матрицы с НКЗ. Из-за упругого торможения скорость движения ПС уменьшается на участке ab (рисунок 6, а), что приводит к уменьшению скорости осадки пробы до значения $f_{p,min}$ (рисунок 6, в). Напряжения в матрице на контакте с НКЗ увеличиваются, пока в ней не накопится упругая энергия, достаточная для сдвига матрицы по поверхности НКЗ.

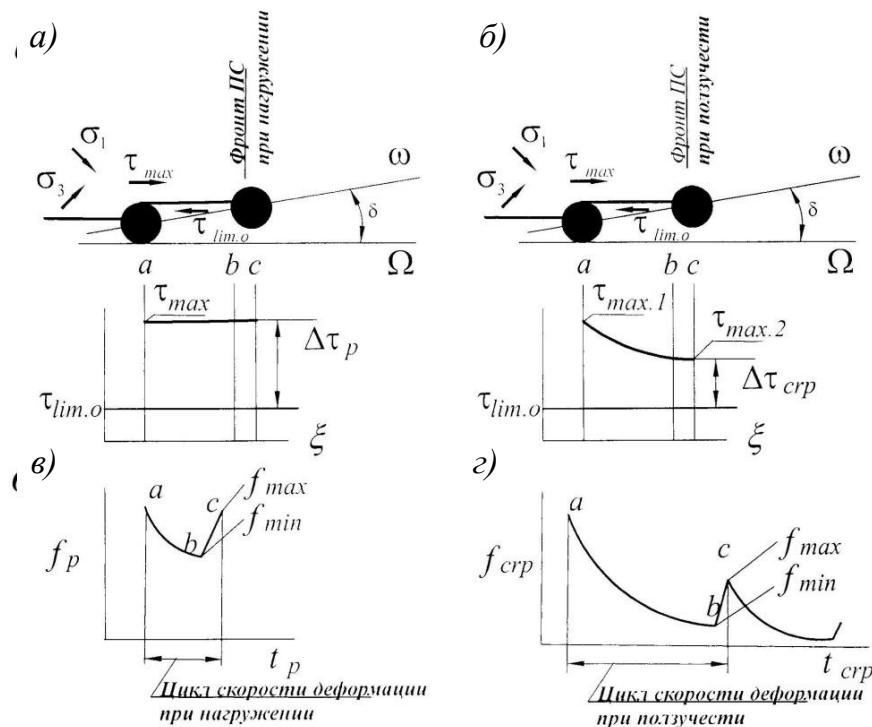


Рисунок 6 – Схема развития поверхности скольжения в грунте и изменения скорости осадки пробы:
а) и в) – при нагружении пробы; б) и г) – при ползучести

Разрушение сдвигом по поверхности НКЗ на участке *bc* происходит с обходом НКЗ. Оно имеет хрупкий характер, его скорость больше скорости увеличения внешней нагрузки, поэтому кооперативный эффект от сдвига на группе НКЗ выражается в увеличении скорости осадки пробы до значения $f_{p,max}$. В целом, два участка графика скорости, *ab* и *bc*, составляют ЦД, на котором осадка пробы увеличивается на Δs_p .

Продолжающееся нагружение пробы активирует матрицу МА и следующую группу НКЗ, вызывая новое перемещение фронта ПС в направлении вектора $\vec{\xi}$ и новое приращение осадки пробы.

В целом по пробе, физическая ПС обходит группы НКЗ, отклоняясь от поверхности $\Omega(\tau_{max} = \tau_{lim})$ на угол δ , связанный с углом внутреннего трения грунта ϕ соотношением $\delta = \phi/2$. Так деформационная неоднородность проявляет себя, создавая эффект внутреннего трения грунта.

Сопротивление грунта на поверхности скольжения при постоянном давлении на пробу

После достижения заданного внешнего давления на пробу её деформация продолжается в виде ползучести. Осадка ползучести s_{crp} изменяется скачками, её скорость изменяется циклически, уменьшается, в общем, с течением времени наблюдения ползучести t_{crp} (рисунки 6, б и 6, г).

Согласно предложенной модели (рисунок 5), осадка ползучести является проявлением движения фронта ПС теми же шагами, что и при нагружении. На 1-м шаге оно происходит в виде вязкого скольжения на участке *ab* (рисунок 6, б) под действием неуравновешенного касательного напряжения:

$$\Delta\tau_{crp,1} = \tau_{max,1} - \tau_{lim}, \quad (5)$$

где $\Delta\tau_{crp,1}$ и $\tau_{max,1}$ – неуравновешенная часть и максимальное касательное напряжение на ПС в момент прекращения нагружения, соответственно.

В направлении вектора $\vec{\zeta}$ максимальное касательное напряжение снижается на участке ab (рисунок 6, 2), т. е. $\tau_{max,1} < \tau_{max}$. Соответственно, скорость вязкого скольжения становится меньше, чем при нагружении:

$$f_{crp,min.1} < f_{p,min}. \quad (6)$$

Для преодоления группы НКЗ необходима та же упругая энергия, что и при нагружении. Но она накапливается за больший промежуток времени $\Delta t_{crp,1} > \Delta t_p$. Накопленная энергия разрушает матрицу на контакте с НКЗ 1-й группы. Сдвиг на участке bc происходит хрупко, со скоростью, большей скорости скольжения на участке ab . Кооперативный эффект выражается в увеличении скорости осадки пробы до значения $f_{crp,max}$.

1-й цикл деформации ползучести (ЦДП) завершается.

Во 2-м ЦДП $\tau_{max,2} < \tau_{max,1}$. В 3-м и последующих ЦДП $\tau_{max,i} < \tau_{max,i-1}$.

Соответственно, скорость ползучести с каждым ЦДП снижается:

– во 2-м ЦДП:

$$f_{crp,min.2} < f_{crp,min.1}, \quad (7)$$

– вообще, в i -м ЦДП:

$$f_{crp,min.i} < f_{crp,min.i-1}, \quad (8)$$

пока разность в правой части формулы для неуравновешенной части касательного напряжения

$$\Delta\tau_{crp,i} = \tau_{max,i} - \tau_{lim}, \quad (9)$$

не обратится в нуль.

Ползучесть пробы при этом завершается.

Следует отметить, что длительность ЦД определяется скоростью увеличения τ_{max} , т. е. внешним фактором. Длительность ЦДП – сочетанием внешних факторов – τ_{max} – и внутренних, присущих испытуемому грунту, в частности значением τ_{lim} . Поэтому реологические параметры микроструктурной модели деформаций, полученные на этапе ползучести, имеют большую надёжность, чем на этапе нагружения.

3. Результаты исследования и их анализ

Проведенные компрессионные испытания пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры выявили принципиально важную особенность деформирования: как в процессе нагружения с постоянной скоростью увеличения давления, так и на стадии ползучести при постоянном давлении, осадка образца увеличивается не плавно, а скачкообразно. Графики осадки во времени демонстрируют серию дискретных скачков, а графики скорости осадки – выраженный циклический характер. Это однозначно свидетельствует о том, что деформация грунта при компрессионном сжатии не является непрерывным однородным процессом, а состоит из последовательности дискретных актов перестройки его микроструктуры. На стадии ползучести амплитуда скачков скорости постепенно затухает, что указывает на затухающий характер релаксационных процессов после приложения нагрузки.

Полученные экспериментальные данные находят последовательное объяснение в рамках предложенной двухкомпонентной микроструктурной модели. Согласно этой модели, скачки осадки интерпретируются как кооперативный результат формирования и лавинообразного распространения поверхностей скольжения, возникающих на фронте максимальных касательных напряжений. Эти поверхности образуются путем объединения локальных площадок сдвига, которые формируются в глинистой матрице вблизи наиболее крупных жёстких зёрен, играющих роль деформационных неоднородностей. Перемещение фронта поверхности скольжения тормозится на этих включениях из-за их высокого упругого сопротивления, что соответствует фазе замедления скорости осадки. Накопленная упругая энергия высвобождается в момент хрупкого сдвига матрицы по поверхности жёсткого включения, что регистрируется как скачок деформации и резкое увеличение скорости.

Таким образом, анализ результатов подтверждает, что ключевой причиной наблюдаемой скачкообразности деформаций является дискретное, структурно-обусловленное взаимодействие сдвигов в глинистой матрице с жёсткими неоднородностями. Этот же механизм объясняет и макроскопическое проявление внутреннего трения, поскольку физическая поверхность скольжения, вынужденная обходить включения, отклоняется от теоретической поверхности максимальных касательных напряжений. Следовательно, деформационная неоднородность грунта, представленная в модели наиболее крупными жёсткими зёрнами, является фундаментальным фактором, определяющим не только скачкообразный характер деформирования, но и его реологические особенности на стадии ползучести.

4. Заключение

1. Деформационная неоднородность грунта порождает скачкообразное увеличение осадки пробы грунта в процессе компрессионного сжатия. Она выявляется при испытании постоянно возрастающей нагрузкой с непрерывным наблюдением за осадкой пробы при нагружении и ползучести с регистрацией данных с шагом не более 0,005 мм.

2. Объяснение скачкообразного изменения осадки пробы глинистого грунта возможно с использованием микроструктурной модели деформаций. В рамках 2-х компонентной модели деформации, деформационная неоднородность грунта представлена наиболее крупными жёсткими включениями в матрице глинистых частиц и микроагрегатов.

3. При нагружении пробы в грунте образуются поверхности скольжения, объединяющие площадки сдвига, возникающие в местах концентрации напряжений на контактах глинистых частиц и микроагрегатов с наиболее крупными жёсткими включениями. Перемещение (медленное) фронта поверхности скольжения происходит внутри глинистой матрицы с торможением на жёстких включениях, чередуясь с перемещением (быстрым) при обходе их поверхностью скольжения. Эти перемещения наблюдаются при нагружении и при ползучести вследствие кооперативной реакции площадок сдвига на внешнюю нагрузку и наблюдаются как при нагружении, так и при ползучести.

4. Деформационная неоднородность грунта является причиной отклонения физической поверхности скольжения от поверхности максимальных касательных напряжений, известного как «эффект внутреннего трения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н.А., Зарецкий Ю.К., Малышев М.В. и др. Прогноз скорости осадок оснований сооружений (консолидация и ползучесть многофазных грунтов). М.: Стройиздат, 1967. 239 с.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
3. Вялов С.С. Кинетическая теория деформирования грунтов // Тр. второго Всесоюз. симп. по реологии грунтов. Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1976. С. 22-40.
4. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (Основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 375 с.
5. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 136 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
7. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1985. 288 с.
8. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1937.
9. Тер-Степанян Г.И. Теория ползучести глины при сдвиге и её экспериментальное подтверждение // Тр. Всесоюз. симпоз. по реологии грунтов. Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1976. С. 74-97.
10. Yang A., Liu T., Zhang H.*, Zhang B. A study on the creep characteristics of gassy clay mixed with silt // Applied Sciences (Basel). 2025. Vol. 15, № 9. Pp. 5106. DOI: 10.3390/app15095106.
11. Zhou F., Wang L., Liu H. A fractional elasto-viscoplastic model for describing creep behavior of soft soil // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16, № 1. Pp. 67-76. DOI: 10.1007/s11440-020-01008-5.

12. Мирзоев К.М., Николаев А.В. Скачкообразность пластических деформаций и возможности управляемого снятия накопленных напряжений // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 3. С. 12-30.
13. Sharafutdinov R. F. Laboratory and in-situ investigations of deviatoric creep in overconsolidated clay soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2025. Vol. 62. Pp. 25-33. DOI: 10.1007/s11204-025-10024-0.
14. Денисов Н.Я. Некоторые особенности деформаций глинистых пород // Природа прочности и деформаций грунтов. М.: Стройиздат, 1972. С. 85-89.
15. Han J., Yin Z.Y., Dano C. et al. Cyclic and creep combination effects on the long-term undrained behavior of overconsolidated clay // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16, № 4. Pp. 1027-1041. DOI: 10.1007/s11440-020-01078-5.
16. Olek B.S. Experimental insights into consolidation rates during one-dimensional loading with special reference to excess pore water pressure // Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15, № 12. Pp. 3571-3591. DOI: 10.1007/s11440-020-01042-3.
17. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы: монография. М.: Изд-во Наука, 1967. 583 с.
18. Xue K., Wang S., Hu Y. et al. Creep behavior of red-clay under triaxial compression condition // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. P. 345. DOI: 10.3389/feart.2019.00345.
19. Mohammad Rezania M., Bagheri M., Mousavi Nezhad M. Creep and consolidation of a stiff clay under saturated and unsaturated conditions // Canadian Geotechnical Journal. 2020. Vol. 57, № 5. Pp. 728-741. DOI: 10.1139/cgj-2018-0398.
20. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении // Известия КГСАУ, 2017, № 1(39) С. 145-152.
21. Yin Q., Zhao Y., Gong W. et al. A fractal order creep-damage constitutive model of silty clay // Acta Geotechnica. 2023. Vol. 18, № 12. Pp. 3997-4016. DOI: 10.1007/s11440-023-01815-6.
22. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Мариничев М.Б. Испытания грунта и расчёты основания фундамента: монография. Краснодар: КубГАУ, 2025. 152 с.
23. Тер-Мартиросян З.Г. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2005. 488 с.
24. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Совершенствование метода компрессионных испытаний грунтов постоянно возрастающей нагрузкой: монография. Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2017. 173 с.

REFERENCES

1. Tsytovich N.A., Zaretsky Yu.K., Malyshev M.V., et al. *Forecast of settlement rate of foundations of structures (consolidation and creep of multiphase soils)*. Moscow: Stroyizdat, 1967. 239 p.
2. Tsytovich N.A. *Soil mechanics*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. 288 p.
3. Vyalov S.S. Kinetic theory of soil deformation. *Proceedings of the Second All-Union Symposium on Soil Rheology*. Yerevan: Yerevan University Press, 1976. Pp. 22-40.
4. Goldstein M.N. *Mechanical properties of soils (Main components of soil and their interaction)*. Moscow: Stroyizdat, 1973. 375 p.
5. Malyshev M.V. *Soil strength and stability of building foundations*. Moscow: Stroyizdat, 1980. 136 p.
6. Osipov V.I., Sokolov V.N. *Clays and their properties*. Moscow: GEOS, 2013. 576 p.
7. Sergeev E.M. (Ed.) *Theoretical foundations of engineering geology. Physical and chemical foundations*. Moscow: Nedra, 1985. 288 p.
8. Pokrovsky G.I. *Research in soil physics*. Moscow-Leningrad: Main editorial office of construction literature, 1937.
9. Ter-Stepanyan G.I. Theory of clay creep under shear and its experimental confirmation. *Proceedings of the All-Union Symposium on Soil Rheology*. Yerevan: Yerevan University Press, 1976. Pp. 74-97.
10. Yang A., Liu T., Zhang H., Zhang B. A study on the creep characteristics of gassy clay mixed with silt. *Applied Sciences (Basel)*. 2025. Vol. 15. No. 9. P. 5106. DOI: 10.3390/app15095106.
11. Zhou F., Wang L., Liu H. A fractional elasto-viscoplastic model for describing creep behavior of soft soil. *Acta Geotechnica*. 2021. Vol. 16. No. 1. Pp. 67-76. DOI: 10.1007/s11440-020-01008-5.
12. Mirzoev K.M., Nikolaev A.V. Jump-like nature of plastic deformations and possibilities of controlled removal of accumulated stresses. *Geophysical research*. 2015. Vol. 16. No. 3. Pp. 12-30.
13. Sharafutdinov R.F. Laboratory and in-situ investigations of deviatoric creep in overconsolidated clay soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2025. Vol. 62. Pp. 25-33. DOI: 10.1007/s11204-025-10024-0.
14. Denisov N.Ya. Some features of deformations of clay rocks. *The nature of strength and deformations of soils*. Moscow: Stroyizdat, 1972. Pp. 85-89.
15. Han J., Yin Z.Y., Dano C. et al. Cyclic and creep combination effects on the long-term undrained behavior of overconsolidated clay. *Acta Geotechnica*. 2021. Vol. 16. No. 4. Pp. 1027-1041. DOI: 10.1007/s11440-020-01078-5.
16. Olek B.S. Experimental insights into consolidation rates during one-dimensional loading with special reference to excess pore water pressure. *Acta Geotechnica*. 2020. Vol. 15. No. 12. Pp. 3571-3591. DOI: 10.1007/s11440-020-01042-3.

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

17. Nerpin S.V., Chudnovsky A.F. *Soil Physics: monograph*. Moscow: Nauka Publishing House, 1967. 583 p.
18. Xue K., Wang S., Hu Y. et al. Creep behavior of red-clay under triaxial compression condition. *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. P. 345. DOI: 10.3389/feart.2019.00345.
19. Mohammad Rezania M., Bagheri M., Mousavi Nezhad M. Creep and consolidation of a stiff clay under saturated and unsaturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*. 2020. Vol. 57. No. 5. Pp. 728-741. DOI: 10.1139/cgj-2018-0398.
20. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Influence of the hardening process on the strength of clay soil under regime triaxial loading. *Izvestiya KGSAU*. 2017. No. 1(39). Pp. 145-152.
21. Yin Q., Zhao Y., Gong W. et al. A fractal order creep-damage constitutive model of silty clay. *Acta Geotechnica*. 2023. Vol. 18. No. 12. Pp. 3997-4016. DOI: 10.1007/s11440-023-01815-6.
22. Lyashenko P.A., Denisenko V.V., Marinichev M.B. *Soil testing and foundation base calculations: monograph*. Krasnodar: KubSAU, 2025. 152 p.
23. Ter-Martirosyan Z.G. *Soil mechanics*. Moscow: ASV Publishing House, 2005. 488 p.
24. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. *Improving the method of compression testing of soils with constantly increasing load: monograph*. Krasnodar: KubSTU Publishing House, 2017. 173 p.

Информация об авторах:

Мариничев Максим Борисович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов.

E-mail: marinichev@list.ru

Ляшенко Павел Алексеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов.

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кадастра и геоинженерии.

E-mail: denvivi@yandex.ru

Information about authors:

Marinichev Maxim B.

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia,
doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of foundations and foundations.
E-mail: marinichev@list.ru

Lyashenko Pavel Al.

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, professor of the department of foundations and foundations.
E-mail: lyseich1@yandex.ru

Denisenko Viktor V.

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of cadastre and
geoengineering.
E-mail: denvivi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2025
Одобрена после рецензирования 09.11.2025
Принята к публикации 11.11.2025

The article was submitted 10.10.2025
Approved after reviewing 09.11.2025
Accepted for publication 11.11.2025

С.Ю. САВИН¹, А.А. ЛИЗОГУБ²

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

²Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИОПОРНЫХ ЗОН РИГЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНЫХ КАРКАСОВ В ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Аннотация: В современных условиях возрастает риск аварийных воздействий на здания, что делает традиционные стратегии проектирования, основанные на исключении таких воздействий или проектировании ключевых элементов, недостаточно эффективными и экономически неоправданными. Наиболее перспективным подходом является обеспечение живучести конструкций путем ограничения масштабов обрушения после начального локального разрушения. Целью исследования является разработка расчетной модели сопротивления приопорного участка ригеля железобетонного рамного каркаса здания при многоуровневом деформировании в запредельном состоянии, возникающем в результате аварийной ситуации. Приводится обоснование выбора физической модели сопротивления в виде конструктивного узла с приопорными участками ригелей и колонн. Разработана расчетная модель сопротивления приопорных участков ригелей железобетонного рамного каркаса здания при многоуровневом деформировании в запредельном состоянии, возникающем в результате аварийной ситуации. Получены аналитические выражения для характерных точек диаграммы «Момент – угол поворота в пластическом шарнире» при работе конструкций перекрытия над местом начального локального разрушения по изгибной и арочной схемам, а также диаграммы «Продольная сила – удлинение» при работе по цепной схеме. Предложенный подход позволяет оценить несущую способность железобетонных каркасов в запредельных состояниях, возникающих после аварийного воздействия. Полученные результаты могут быть использованы для практического расчета и проектирования конструкций, направленного на повышение их живучести.

Ключевые слова: живучесть, прогрессирующее обрушение, арочная стадия, цепная стадия, железобетон, каркас, узел

S.Y. SAVIN¹, A.A. LIZAHUB²

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Brest State Technical University, Brest, Belarus

MULTI-STAGE DEFORMATION OF PLASTIC HINGES IN RC FRAME BEAMS AT ACCIDENTAL ACTIONS

Abstract. The risk of accidental damage to buildings is currently increasing. This makes traditional design strategies, which focus on eliminating such impacts or designing key elements, ineffective and economically unreasonable. The most promising approach is to ensure the robustness of structures by limiting the extent of collapse after initial local failure. The goal of this study is to develop a calculation model for the resistance of a beam support section of a reinforced concrete frame under multi-level deformation in an accidental situation. The rationale for selecting a physical resistance model in the form of a structural node with support sections of beams and columns is explained. A calculation model has been developed to determine the resistance of support sections of beams in a reinforced concrete frame building under multi-level deformation in an extreme state resulting from an accidental situation. Analytical expressions have been obtained for the characteristic points of the "moment-rotation angle in a plastic hinge" diagram for flexural and compressive arch action, as well as for the "axial force-elongation" diagram for tensile catenary action.

The proposed approach enables the evaluation of the load-bearing capacity of reinforced concrete frames under extreme conditions resulting from accidental events. The results of the study can be used to design structures that are more robust.

Keywords: robustness, progressive collapse, compressive arch action, tensile catenary action, reinforced concrete, frame, joint

1. Введение

В последние годы актуальной проблемой стало обеспечение механической безопасности железобетонных многоэтажных каркасов зданий при аварийных воздействиях различного характера [1–4]. Это связано с ростом террористической опасности, региональными конфликтами, в которых применяются новые дальнобойные средства поражения. По этой причине использование стратегий защиты, основанных на исключении аварийного воздействия или учете его параметров в проектном расчете отдельных несущих элементов каркасов зданий не может обеспечить необходимый уровень безопасности. Несмотря на относительно низкую вероятность реализации аварийного воздействия на элемент конструктивной системы отдельно взятого здания, такое воздействие может приводить к катастрофическим последствиям в результате обрушения всего здания или его части, непропорциональной размерам начального локального разрушения. В связи с этим для обеспечения механической безопасности зданий при аварийных воздействиях различного характера наиболее оправданным является применение стратегий, основанных на ограничении масштаба вторичных разрушений при сценарии внезапного начального локального разрушения одного из элементов. В этом случае вместо расчета на аварийное воздействие выполняется оценка живучести поврежденного каркаса здания в аварийной расчетной ситуации и применение специальных мер конструирования, таких как устройство системы дополнительных горизонтальных и вертикальных связей. При этом очевидным является то, что обеспечение механической безопасности железобетонных каркасов зданий в рамках физических и расчетных моделей, используемых для обоснования проектных решений на основные сочетания нагрузок, соответствующих условиям нормальной эксплуатации строительных объектов, могут приводить к значительным и неоправданным экономически затратам. Поэтому необходимо выявить возможные резервы сопротивления железобетонных каркасов зданий с учетом многоуровневого деформирования конструктивных систем, а не отдельных сечений в запредельных состояниях. В качестве таких состояний в исследовании рассматриваются состояния конструкций после превышения критериев прочности сечений, установленных по первой группе предельных состояний, например, после достижения текучести в арматуре или разрушения бетона сжатой зоны для изгибаемых элементов [5–11].

Таким образом, оценка несущей способности и деформативности конструкций железобетонных каркасов зданий в запредельных состояниях требует совершенствования физических моделей сопротивления и на их основе разработки расчетных моделей конструкций с учетом новых предпосылок, гипотез и допущений. Анализ представленных в научной литературе результатов теоретических и экспериментальных исследований [12–15] позволяет выделить в качестве физических моделей сопротивления – узлы рамных каркасов зданий и прилегающие к ним участки ригелей и колонн, в которых выполняется условие $M > M_{crc}$ и/или $Q > Q_{crc}$. Однако в [12–15] не рассматривались специфические уровни деформирования поврежденных железобетонных каркасов зданий в запредельных состояниях, возникающих в результате аварийных воздействий. В качестве таких уровней деформирования для ригелей перекрытий и покрытия могут быть выделены арочная и цепная схемы работы.

Арочная схема работы (англ. Compressive Arch Action, CAA) реализуется при ограничении горизонтальных перемещений опорных сечений ригеля. В этом случае в приопорных зонах возникает распор, который позволяет перераспределить усилия и

увеличить несущую способность элемента после достижения предела текучести арматуры. Арочная стадия характеризуется ростом изгибающего момента и угла поворота в пластическом шарнире за счёт включения в работу дополнительных силовых факторов. Таким образом, арочная схема выступает промежуточным уровнем деформирования между изгибной стадией и стадией развития мембранных эффектов.

Цепная схема работы (англ. Tensile Catenary Action, TCA) развивается при значительных вертикальных прогибах, когда основную роль начинают играть растянутые горизонтальные связи и арматурные стержни, работающие на растяжение. В этой стадии сопротивление конструкции определяется продольными усилиями и удлинением связей, а диаграмма « $N-w$ » (продольная сила – удлинение) описывает нелинейное поведение системы. Цепная схема обеспечивает дополнительный резерв несущей способности за счёт мобилизации мембранных эффектов, однако её реализация связана с риском последовательного отказа связей (zipper-type collapse), что требует учёта предельных деформаций арматуры и сцепления с бетоном.

В исследованиях Трекина Н.Н. и Кодыша Э.Н. [16,17] на основе анализа результатов экспериментальных исследований железобетонных балок и плит вводится ограничение относительного прогиба изгибаемых железобетонных элементов $1/30$ для элементов с арматурой, обладающей физическим пределом текучести, и $1/50$ для элементов с высокопрочной арматурой с условным переделом текучести. Однако такое ограничение справедливо применительно к симметричным пролетам конструкций перекрытий (см., рисунок 1 (а)).

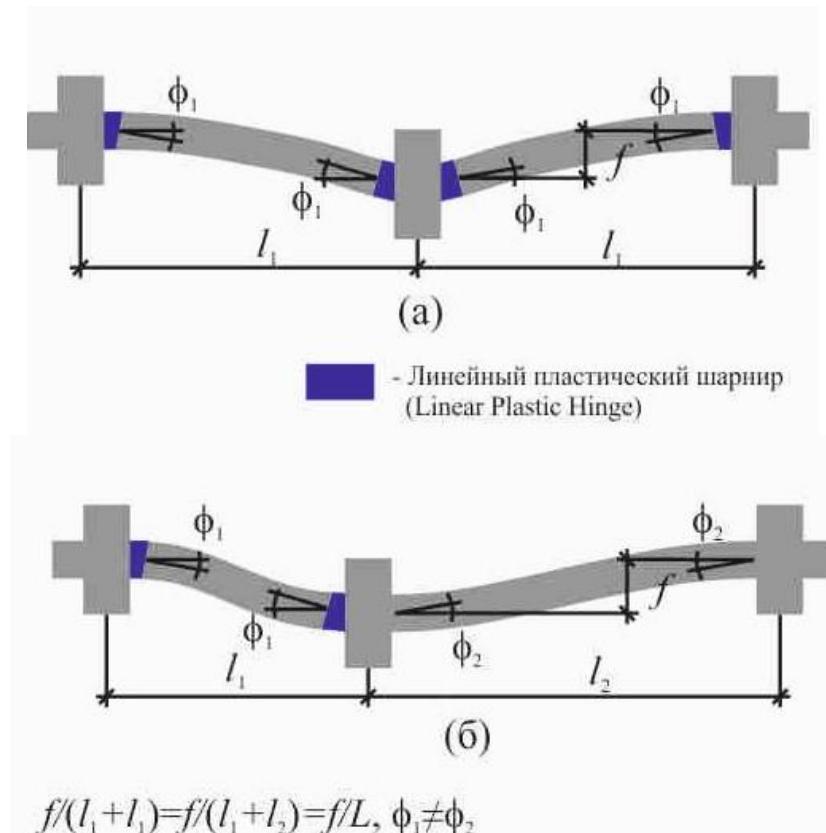


Рисунок 1 – Варианты подконструкций железобетонного рамного каркаса здания в зоне возможного локального разрушения: (а) при симметричных пролетах; (б) при несимметричных пролетах

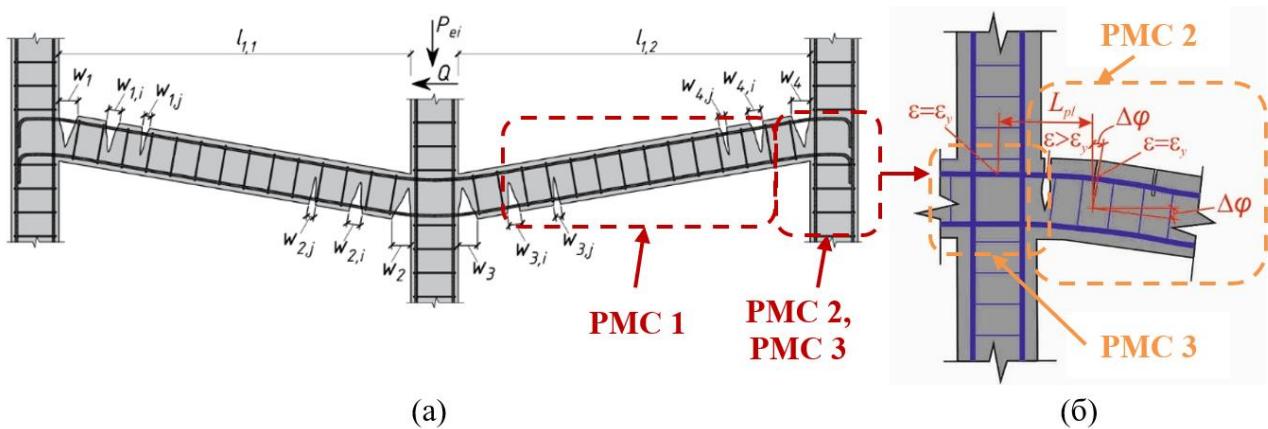
Из рисунка 1 (б) видно, что углы поворота опорных сечений ригелей в зависимости от соотношения пролетов будут меняться. Соотношение размеров пролетов будет влиять на то, в каком сечении будут раньше достигнуты предельные деформации и на величину нагрузки, вызывающей такие деформации. Поэтому более универсальным критерием является предельный угол поворота в пластическом шарнире, который, например, используется в

нормах США [18] при оценке коэффициентов динамичности к нагрузкам на железобетонные каркасы здания в рамках процедуры нелинейного статического анализа. В научной литературе представлено ограниченное количество экспериментальных исследований крупномасштабных и полноразмерных подконструкций железобетонных каркасов зданий при сценарии вынужденного удаления одного из несущих элементов в связи с затратностью подобных испытаний. При этом анализ имеющихся опытных данных [6,7,19–22] позволяет отметить следующее. В результате начального локального разрушения наибольшие усилия и, соответственно, повреждения в каркасе здания наблюдаются в конструктивных узлах и на участках ригелей и колонн, прилегающих к узлам, то есть в зонах PMC-3 и PMC-2 согласно терминологии, приведенной в работе [15]. В этих зонах относительные деформации в растянутой арматуре в аварийной ситуации могут превысить предел текучести. При этом в научной литературе практически отсутствуют исследования многоуровневого деформирования рассматриваемых при опорных зон.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка расчетной модели сопротивления при опорного участка ригеля железобетонного рамного каркаса здания при многоуровневом деформировании в запредельных состояниях, возникающих в результате аварийной ситуации.

2. Модели и методы

Для оценки живучести железобетонного рамного каркаса здания в аварийной расчетной ситуации выделим характерный фрагмент – расчетную модель второго уровня, непосредственно прилегающий к месту начального локального разрушения (рис. 2 а) и рассмотрим сопротивление при опорных участков элементов, прилегающих к конструктивным узлам (рис. 2 б).



*Рисунок 2 - Расчетные модели сопротивления третьего уровня (блок, узел) для оценки несущей способности конструкций железобетонных каркасов зданий в запредельных состояниях:
(а) подконструкция двухпролетного ригеля над местом начального локального разрушения;
(б) конструктивный узел*

Деформирование подконструкции двухпролетного ригеля (рис. 2 а), следуя [23], может быть описано с использованием диаграммы «Обобщенная нагрузка – характерный прогиб» (рис. 3 а). Если горизонтальное смещение опорных сечений ригелей (зона PMC-2) ограничено вертикальными элементами, то в рассматриваемой подконструкции возникнет распор N . Хотя распор возникает на начальных этапах нагружения, его влияние становится заметным лишь по мере роста деформаций, которые начинают интенсивно расти после достижения предела текучести в растянутой арматуре в при опорной зоне ригеля. Таким образом, реализация

арочной схемы работы ригелей перекрытия каркаса здания произойдет при соблюдении условия:

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{s,el} = \frac{R_{sn}}{E_s}, \quad (1)$$

где ε_s – относительная деформация в растянутой арматуре на припорном участке ригеля;

R_{sn} – нормативное сопротивление арматуры одноосному растяжению, принимаемый согласно [24];

E_s – модуль упругости стальной арматуры.

При оценке несущей способности в запредельном состоянии элементов каркаса для стальной арматуры принимается билинейная диаграмма работы с упрочнением (рис. 4 а), параметры которой могут быть назначены в соответствии с ГОСТ Р 52544-2006¹. При этом деформирование припорной зоны ригеля определяется параметрами сцепления арматуры и бетона, которые могут быть приняты в соответствии с Model Code [25] (рис. 4 б).

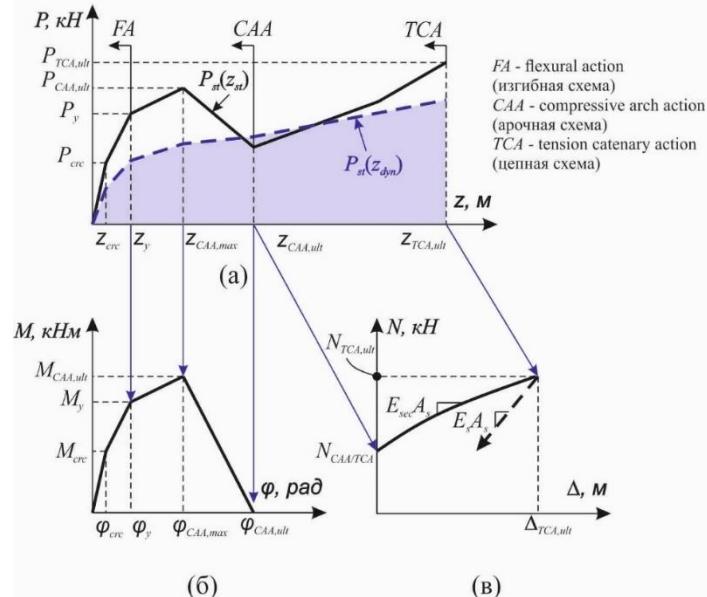


Рисунок 3 - Диаграммы деформирования элементов конструкций в запредельных состояниях:
(а) диаграмма «Обобщенная нагрузка – характерный прогиб» для подконструкции двухпролетного ригеля над метом начального локального разрушения; (б) диаграмма «Момент – угол поворота в пластическом шарнире» для припорной зоны PMC-2 при работе по изгибной и арочной схемам; (в) диаграмма «Продольная сила – удлинение» для припорной зоны PMC-2 при работе по цепной схеме

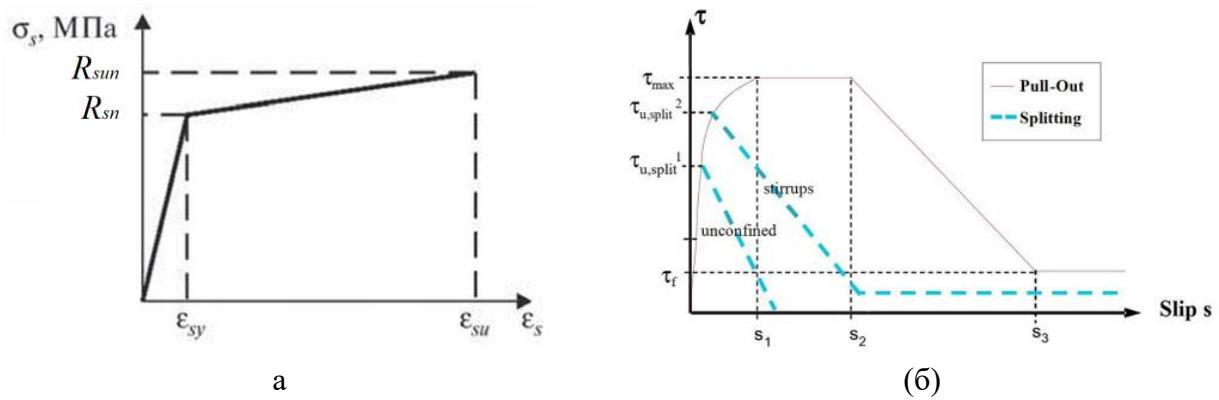


Рисунок 4 - Диаграммы: (а) – билинейная диаграмма с упрочнением [26]; (б) – общий вид диаграммы «условные касательные напряжения – проскальзывание» согласно [25]

¹ ГОСТ Р 52544-2006 Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2006. 23 с.

3. Результаты исследования и их анализ

3.1. Изгибная стадия напряженно-деформированного состояния ригеля

Параметры диаграммы «Обобщенная нагрузка – характерный прогиб» (рис. 3 а) для подконструкции двухпролетного ригеля над метом начального локального разрушения могут быть установлены с использованием зависимостей, приведенных в [23]. С учетом этого определим характерные точки диаграммы «Момент – угол поворота в пластическом шарнире» (рис. 3 б) для возможности применения к специальным конечным элементам нелинейно упругих связей.

В момент образования трещин в растянутом бетоне на припорном участке ригеля:

$$M_{crc} = R_{bmn} W_{pl} \pm Ne; \quad (2)$$

$$\varphi_{crc} = \int_0^{L_{pl}} \frac{M(x)}{EI_{red}} dx, \quad (3)$$

где R_{bmn} – нормативное сопротивление бетона одноосному растяжению, принимаемое по [24];

W_{pl} – упругопластический момент сопротивления сечения;

N – продольная сила в ригеле, принимаемая со знаком «+» при сжатии и со знаком «–» при растяжении;

e – расстояние от центра тяжести сечения до ядровой точки;

L_{pl} – предельная длина пластического шарнира определяемая согласно [25,26] из условия:

$$L_{pl} = \frac{R_{sun} - R_{sn}}{\tau_{bm,pl}} \frac{d_s}{4}, \quad (4)$$

где $\tau_{bm,pl} = 0,27\tau_{b,max}$ — средние напряжения сцепления на участке работы арматурного стержня в пластической стадии;

d_s – диаметр стержня продольной растянутой арматуры на припорном участке ригеля, который в случае наличия стержней разных диаметров принимается по наименьшему значению;

R_{sun} – временное сопротивление стальной арматуры при разрыве.

Хотя в формулы (2), (3) предполагают практически упругую работу железобетонного элемента, использование предельной длины линейного пластического шарнира, определяемой по формуле (4), позволяет использовать L_{pl} для моделирования припорной зоны ригеля на всех стадиях деформирования элемента в запредельном состоянии.

В формуле (2) допускается в запас жесткости не учитывать продольную силу при работе ригеля по изгибной схеме без трещин.

В момент достижения напряжениями площадки текучести в растянутой арматуре ригеля на припорном участке:

$$M_y = R_{bn}bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc}A'_s(h_0 - a'); \quad (5)$$

$$\varphi_y = L_{pl} \left(\frac{1}{r} \right)_{crc}. \quad (6)$$

В (6) кривизна на длине L_{pl} принята постоянной, определяемой по средним относительным деформациям в бетоне и арматуре на участке между соседними трещинами (или передачи усилий с арматуры на бетон при единичных трещинах):

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{crc} = \frac{\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{bm}}{h_0} = \frac{M_y - 0,8M_{crc}}{E_s A_s z_s h_0} + \frac{0,9M_y}{E_{b,red} A_b z_s h_0}. \quad (7)$$

где z_s, A_b – плечо внутренней пары сил и площадь сжатого бетона определяемые из расчета по предельным усилиям для изгибной стадии работы элемента.

3.2. Арочная стадия напряженно-деформированного состояния ригеля

Наибольший изгибающий момент воспринимаемый на арочной стадии работы ригеля и соответствующий ему поворот $\varphi_{CAA,max}$ определяются с учетом влияния распора из условия:

$$\frac{\partial M_{ult}}{\partial z} = 0 \Rightarrow \varphi_{CAA,max}, \quad (8)$$

где

$$M_{ult} = R_{bn}bx(h_0 - 0.5x) + (R_{sc}A'_s - 0.5N(z))(h_0 - a'). \quad (9)$$

В (9) распор $N(z)$ вычисляется с учетом величины прогиба двухпролетного ригеля по формуле:

$$N(z) = \Delta L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \left[\left(l_1^2 + 2(h_0 - a')z - z^2 \right)^{\frac{1}{2}} - l_1 \right] \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (10)$$

Здесь C_1, C_2 — реакции от единичного горизонтального смещения левого и правого опорных сечений условной арки, которые определяются как суммарная опорная реакция от единичного смещения во всех вертикальных элементах нижерасположенного и вышерасположенного этажа.

При этом угол поворота определяется по формулам (6), (7) с учетом замены M_y на M_{ult} и проскальзывания арматуры:

$$\varphi_{CAA,max} \cong \frac{\Delta L}{h_0 - x} = \frac{\left(l_1^2 + 2(h_0 - a')z - z^2 \right)^{\frac{1}{2}} - l_1}{h_0 - x}. \quad (11)$$

В момент перехода к цепной стадии работы, принимая в первом приближении $z_{CAA,ult} = (h_0 - a')$, получим [23]:

$$P_3 = (h_0 - a') \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si}}{l_1 - \Delta_{x1}} + \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj}}{l_2 - \Delta_{x2}} \right). \quad (12)$$

Здесь σ_{s1}, σ_{s2} могут быть определены согласно [25]:

$$\sigma_{si,max} = 2,39 \sqrt{\frac{\tau_{b,max} E_s}{d_s} \Delta L_{CAA}^{1,4}} \leq R_s. \quad (13)$$

где $\tau_{b,max}$ – максимальные напряжения сцепления, соответствующие упругой работе арматуры; d_s – диаметр стержня продольной арматуры; ΔL_{CAA} – максимальное удлинение грани ригеля при переходе от арочной к цепной схеме работы, определяемая по формуле:

$$\Delta L_{CAA} = \sqrt{l_1^2 + (h_0 - a')^2} - l_1. \quad (14)$$

Отсюда предельный угол поворота $\varphi_{CAA,ult}$:

$$\varphi_{CAA,ult} \cong \frac{\Delta L_{CAA}}{h_0 - x} = \frac{\sqrt{l_1^2 + (h_0 - a')^2} - l_1}{h_0 - x}. \quad (15)$$

Для стержней продольной арматуры, расположенных на расстоянии z_{si} от центра тяжести сжатой продольной арматуры в сечении, получим ΔL_{si} :

$$\Delta L_{si} = \frac{\Delta L_{CAA}}{h_0 - a'} z_{si}. \quad (16)$$

Подставляя ΔL_{si} вместо ΔL_{CAA} в формулу (13), найдем напряжения σ_{si} во всех стержнях продольной арматуры в сечении.

3.3. Цепная стадия напряженно-деформированного состояния ригеля

При соблюдении условия $\sigma_s < R_{su}$ для деформированного состояния конструкции в переходном состоянии ($P_{CAA/TCA}$, $Z_{CAA,ult}$) предельный прогиб $Z_{TCA,ult}$ в момент обрыва наиболее растянутых арматурных стержней в одном из опорных сечений на цепной стадии напряженно-деформированного состояния может быть найден согласно [23], если принять $\sigma_s = R_{su}$:

$$z_{TCA,ult} = \sqrt{(l_1 + \Delta L_{TCA})^2 - (l_1 - \Delta_x)^2}, \quad (17)$$

$$\Delta L_{TCA} = \frac{R_{su} - R_s}{\tau_{bm,pl}} \frac{d_s}{4} \frac{\varepsilon_{su}}{2} + \frac{R_s}{E_s} 2d_s + 0,288 \left(\frac{d_s R_s^2}{\tau_{b,max} E_s} \right)^{0,714}. \quad (18)$$

Предельная нагрузка $P_{TCA,ult}$ вычисляется по формулам (12), подставляя $Z_{TCA,ult}$ вместо $(h_0 - a')$.

В этом случае параметры диаграммы «Продольная сила – удлинение» (рис. 3 в) для приопорной зоны РМС-2 при работе по цепной схеме:

$$N = \sigma_{si,max} A_s; \quad (19)$$

$$\Delta = \Delta L_{TCA}, \quad (20)$$

где

$$\sigma_{si,max} = R_s + \frac{R_{su} - R_s}{\varepsilon_{su}} (\varepsilon_{s,max} - \varepsilon_{s2}), \quad (21)$$

$$\varepsilon_{s,max} = \left\{ \frac{8\tau_{bm,pl}\varepsilon_{su}}{d_s(R_{su} - R_s)} \left[\Delta L_{TCA} - 0,288 \left(\frac{d_s R_s^2}{\tau_{b,max} E_s} \right)^{0,714} - 2d_s \frac{R_s}{E_s} \right] + \varepsilon_{s2}^2 \right\}^{0,5}, \quad (22)$$

Таким образом, получены зависимости для описания работы линейного пластического шарнира на приопорном участке ригелей железобетонного рамного каркаса здания. Эти зависимости могут быть использованы при оценке несущей способности железобетонных рамных каркасов многоэтажных зданий в аварийной расчетной ситуации, вызванной начальным локальным разрушением.

4. Заключение

1. На основе анализа экспериментальных данных и нормируемых критериев, используемых при расчете по особому предельному состоянию и оценке живучести железобетонных рамных каркасов зданий, выделена физическая модель в виде рамного узла с учетом приопорных участков ригелей и колонн.

2. Разработана расчетная модель сопротивления приопорных участков ригелей железобетонного рамного каркаса здания при многоуровневом деформировании в запредельном состоянии, возникающем в результате аварийной ситуации. Получены аналитические выражения для характерных точек диаграммы «Момент – угол поворота в пластическом шарнире» при работе конструкций перекрытия над местом начального локального разрушения по изгибной и арочной схемам, а также диаграммы «Продольная сила – удлинение» при работе по цепной схеме. Важно отметить, что предложенные аналитические выражения могут быть непосредственно использованы в конечно-элементных программных комплексах в качестве параметрических зависимостей, описывающих работу пластических шарниров. Их применение обеспечивает возможность моделирования пространственного поведения конструктивной системы в целом, включая многоуровневое деформирование узлов и приопорных зон в запредельных состояниях.

3. Полученные результаты могут быть использованы в практических расчетах при проектировании железобетонных рамных каркасов для подбора и обоснования конструктивных решений, обеспечивающих живучесть зданий при аварийных воздействиях.

5. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

Исследование выполнено в рамках гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т23РНФМ-060.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research grant No. T23RNFM-060.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024;(3):31-71. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71>
2. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023;3(3):62-74. <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.3.62-74>
3. Травуш В. И., Колчунов В. И., Клюева Н. В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11.
4. Лизогуб А.А., Тур А.В., Тур В.В. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона // Строительство и реконструкция. 2023;(4):93-105. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-108-4-93-105>
5. Савин С.Ю. Уровни напряженно-деформированного состояния конструкций железобетонных рам при аварийных воздействиях // Известия вузов. Строительство. 2025. № 6. С. 5–21. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-5-21>.
6. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // Eng Struct. 2017. Т. 139. Pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>
7. Pham A.T., Brennei, C., Roller C., Tan, K. H. Blast-induced dynamic responses of reinforced concrete structures under progressive collapse // Magazine of Concrete Research. 2022. Т. 74, № 16. Pp. 850–863. <https://dx.doi.org/10.1680/jmacr.21.00115>
8. Wang S., Peng J., Kang S.-B. Evaluation of compressive arch action of reinforced concrete beams and development of design method // Eng Struct. 2019. Т. 191. Pp. 479–492. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.083>
9. Bao Y., Tan K. H. Analytical approach and design method for evaluation of compressive arch action of precast concrete beams // Eng Struct. Elsevier Ltd, 2023. Т. 280. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.083>
10. Almusallam T. et al. ElsanadedyShow all 6 authorsH. AbbasH. AbbasDevelopment limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. Т. 16, № 12. Pp. 1616–1634. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1719166>
11. Tao Y., Huang Y., Yi W. Analytical model for compressive arch action in unbonded prestressed concrete beam-column subassemblages under a column-loss scenario // Eng Struct. 2022. Т. 273. С. 115090. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115090>
12. Kolchunov Vl. I. Deplanation hypotheses for angular deformations in reinforced concrete structures under combined torsion and bending // Building and reconstruction. 2022. Т. 100, № 2. Pp. 3–12. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-3-12>
13. Колчунов Вл.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 3. С. 261–275. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275>
14. Колчунов Вл. И., Федоров В. С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. С. 16–23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>
15. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели сопротивления. М.: Издательство АСВ, 2004. 472 с.
16. Trekin, N., Kodysh, E., Shmakov, S., Terekhov, T., & Kudyakov, K. (2021). Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. 17(1). 108-116. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116>

17. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition of Reinforced Concrete Structures and Its Normalization // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 5, pp. 4-9. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.05.04-09>
18. UFC. UFC 4-023-03. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse // Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. 2016. № November. C. 34–37.
19. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Y., Kaydas P.A. Progressive Collapse Behavior of a Precast Reinforced Concrete Frame System with Layered Beams // Buildings 2024, 14, 1776. <https://doi.org/10.3390/buildings14061776>
20. Kolchunov V. I., Moskovtseva V. S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion // Eng Struct. 2024. T. 314. 118309. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118309>
21. Adam J. M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng Struct. Elsevier, 2018. T. 173, № March. C. 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>
22. Adam J. M. и др. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Eng Struct. 2020. T. 210. C. 110414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414>
23. Savin S. Yu. Stages of Resistance of Reinforced Concrete Frames in Accidental Design Situation // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2025. T. 21, № 4. C. 321–333. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-321-333>
24. СП 63.13330.2018 "СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой РФ, 2020. 150 с.
25. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
26. Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса // Вестник МГСУ. 2021. № 8. С. 1015–1033. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033>

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024;(3):31-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71>
2. Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. *Reinforced concrete structures*. 2023;3(3):62-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.3.62-74>
3. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Industrial and civil engineering*. 2015. No. 3. pp. 4–11.
4. Lizahub A.A., Tur A.V., Tur V.V. Probabilistic approach for assessing the robustness of structural systems made of precast and monolithic reinforced concrete. *Building and Reconstruction*. 2023;(4):93-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-108-4-93-105>
5. Savin S.Yu. Levels of stress-strain state of reinforced concrete frame structures under accidental impacts. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025; (6): 5–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-5-21>
6. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading. *Eng Struct*. 2017. T. 139. Pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.002>
7. Pham A.T., Brennei, C., Roller C., Tan, K. H. Blast-induced dynamic responses of reinforced concrete structures under progressive collapse. *Magazine of Concrete Research*. 2022. T. 74, № 16. Pp. 850–863. <https://dx.doi.org/10.1680/jmacr.21.00115>
8. Wang S., Peng J., Kang S.-B. Evaluation of compressive arch action of reinforced concrete beams and development of design method. *Eng Struct*. 2019. T. 191. C. 479–492. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.083>
9. Bao Y., Tan K. H. Analytical approach and design method for evaluation of compressive arch action of precast concrete beams. *Eng Struct*. 2023. T. 280. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.083>
10. Almusallam T. et al. ElsanadedyShow all 6 authorsH. AbbasH. AbbasDevelopment limitations of compressive arch and catenary actions in reinforced concrete special moment resisting frames under column-loss scenarios. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020. T. 16, № 12. Pp. 1616–1634. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1719166>
11. Tao Y., Huang Y., Yi W. Analytical model for compressive arch action in unbonded prestressed concrete beam-column subassemblages under a column-loss scenario. *Eng Struct*. 2022. T. 273. 115090. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115090>
12. Kolchunov Vl. I. Deplanation hypotheses for angular deformations in reinforced concrete structures under combined torsion and bending. *Building and reconstruction*. 2022. T. 100, № 2. Pp. 3–12. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-3-12>

13. Kolchunov V. I. Method of computational models of resistance for reinforced concrete // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2023. T. 19, № 3. Pp. 261–275. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-261-275>
14. Kolchunov Vl.I., Fedorov V.S. Conceptual hierarchy of models in the theory of resistance of building structures. Industrial and civil engineering. 2020. Pp. 16–23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>
15. Bondarenko V. M., Kolchunov Vl. I. Design models of reinforced concrete structures resistance. Moscow: Publishing ASV, 2004. 472 p.
16. Trekin, N., Kodysh, E., Shmakov, S., Terekhov, T., & Kudyakov, K. (2021). Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. 17(1). 108-116. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116>
17. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition of Reinforced Concrete Structures and Its Normalization. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2020, no. 5, pp. 4-9. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.05.04-09>
18. UFC. UFC 4-023-03. Design of Buildings To Resist Progressive Collapse // Design of Buildings To Resist Progressive Collapse. 2016. № November. C. 34–37.
19. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Y., Kaydas P.A. Progressive Collapse Behavior of a Precast Reinforced Concrete Frame System with Layered Beams. *Buildings*. 2024, 14, 1776. <https://doi.org/10.3390/buildings14061776>
20. Kolchunov V. I., Moskovtseva V. S. Robustness of reinforced concrete frames with elements experiencing bending with torsion // Eng Struct. 2024. T. 314. 118309. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118309>
21. Adam J. M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng Struct.* Elsevier, 2018. T. 173, № March. C. 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>
22. Adam J. M. и др. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Eng Struct.* 2020. T. 210. C. 110414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414>
23. Savin S. Yu. Stages of Resistance of Reinforced Concrete Frames in Accidental Design Situation // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2025. T. 21, № 4. C. 321–333. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-321-333>
24. SP 63.1330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Minstroy RF, 2020. 150 p.
25. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
26. Tur V. V., Tur A. V., Lizahub A. A. Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method. *Vestnik MGSU*. 2021. № 8. Pp. 1015–1033. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033>

Информация об авторах:

Савин Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Лизогуб Александр Александрович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
м.т.н., младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС».

E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru

Information about authors:

Savin Sergey Yu.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Candidate of Tech. Sc., associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures

E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Aliaksandr Al. Lizahub

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

master of eng. science, junior research fellow of BL «RCIC»

E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025

Одобрена после рецензирования 21.11.2025

Принята к публикации 25.11.2025

The article was submitted 18.11.2025

Approved after reviewing 21.11.2025

Accepted for publication 25.11.2025

В.С. ФЕДОРОВ, В.Е. ЛЕВИТСКИЙ¹

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия

СПЕЦИФИКА РЕАКЦИИ БЕТОНА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация. Данная статья является второй в цикле статей, посвященных обобщению и анализу многочисленных опубликованных материалов по исследованию термомеханических свойств бетона при высокотемпературном воздействии. В этой статье приведен обзор опытных данных, касающиеся исследования свойств бетона при кратковременном нагреве и предпринята попытка анализа и структурирования результатов многочисленных, разноплановых испытаний, касающиеся исследования свойств бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве. Рассмотрена физика процесса деформирования бетона при нагреве и его причины. Отражена зависимость получаемых характеристик от условий испытаний. Показаны основные наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на прочностные и деформативные характеристики бетона при нагреве. Развиты представления о механизмах термической деструкции и термосилового сопротивления бетона, подтвержденные специальными методами исследования бетона и его компонентов. Приводятся основные причины изменения прочностных и деформативных характеристик бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве, при этом акцент сделан на выявление влияющих факторов и степени их влияния, а также на обобщение существующих трактовок деградационных механизмов.

Ключевые слова: бетон, температура, прочность, модуль упругости, деформации, компоненты деформации, связь напряжение-деформации.

V.S. FEDOROV, V.E. LEVITSKY¹

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia

SPECIFICITY OF CONCRETE RESPONSE TO HIGH TEMPERATURE

Abstract. This article is the second in a series devoted to summarizing and analyzing numerous published materials on the thermomechanical properties of concrete exposed to high temperatures. This article provides an overview of experimental data related to the study of concrete properties under short-term heating and attempts to analyze and structure the results of numerous, diverse tests related to the study of concrete properties under short-term high-temperature heating. The physics of concrete deformation during heating and its causes are discussed. The dependence of the obtained characteristics on test conditions is demonstrated. The key factors influencing the strength and deformation properties of concrete during heating are highlighted. Concepts regarding the mechanisms of thermal degradation and thermal resistance of concrete are developed, supported by specialized methods for studying concrete and its components. The main causes of changes in the strength and deformation properties of concrete during short-term high-temperature heating are presented, with an emphasis on identifying the influencing factors and their degree of influence, as well as summarizing existing interpretations of degradation mechanisms.

Keywords: concrete, temperature, strength, elastic modulus, deformation, strain components, stress-strain relationship.

1. Введение

За последние шесть с лишним десятилетий накоплен значительный массив опытных данных по влиянию кратковременного высокотемпературного нагрева на механические свойства бетона, полученных для материала различного состава и в различных условиях испытаний [1]. Однако до сих пор отсутствует целостное, физически обоснованное объяснение источников и причин изменения прочностных и деформативных характеристик бетона во всем диапазоне положительных температур, характерных для условий пожара. Эффективные расчётные модели реакции бетона на совместное термосиловое воздействие должны базироваться на чётком определении физических и химических механизмов термической деструкции, выявлении наиболее значимых влияющих факторов, а также на разделении соответствующих компонентов деформаций и их адекватном математическом описании [1,2].

Актуальность данной работы, являющейся второй в цикле статей, посвященных обобщению и анализу исследований термомеханических свойств бетона, обусловлена необходимостью систематизации разрозненных и зачастую противоречивых экспериментальных результатов. Как показывает анализ литературы, реакция бетона на нагрев определяется сложным взаимодействием трёх основных составляющих: цементного камня, заполнителя и контактной зоны между ними. Поведение цементного камня, в свою очередь, существенно зависит от процессов, происходящих в его ключевом структурном компоненте – тоберморитовом геле (C-S-H), и в кристаллическом сростке, а также от миграции влаги [1, 2]. Удаление свободной и физически связанной воды, дегидратация гидратных фаз, фазовые превращения в заполнителях (такие как α - β переход кварца при 573°C) и возникающая термическая несовместимость компонентов приводят к сложной, нелинейной зависимости прочности и деформативности от температуры [3, 4, 5].

Несмотря на обширные экспериментальные исследования, такие как работы Malhotra [6], Anderberg и Thelandersson [3], Schneider [7, 8], ряд фундаментальных вопросов остаётся дискуссионным. В частности, недостаточно изучены физические причины снижения модуля упругости и различного снижения прочности при растяжении по сравнению с прочностью при сжатии [9], а также природа дополнительных деформаций (переходной термической ползучести, или LITS), возникающих при нагреве под нагрузкой [10, 11]. Отсутствует единая интерпретация механизмов, объясняющих, почему предварительное нагружение может влиять на сохранение прочности и модуля упругости [1, 6, 12].

Целью данной статьи является обзор, анализ и структурирование многочисленных опытных данных, касающихся поведения бетона при кратковременном высокотемпературном нагреве.

Такой подход позволит сформировать более ясную физическую картину, необходимую для разработки усовершенствованных и практически применимых моделей поведения бетонных конструкций в условиях пожара.

2. Модели и методы

Бетон является композитным материалом, компоненты которого имеют разные свойства, зависящие от влажности, пористости, вида крупного заполнителя и соотношения компонентов. Поэтому для дальнейшего анализа примем во внимание, что механизм термосилового сопротивления бетона складывается из трёх составляющих: (1) – сопротивление цементного камня; (2) – сопротивление заполнителя; (3) – сопротивление контактного слоя между ними.

Основным структурным компонентом, обычно занимающим в объёме цементного камня около 70-80%, является тоберморитовый гель – гидросиликат кальция $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, или в обозначениях химии цемента C-S-H. Остальные примерно 25% объёма приходятся на кристаллический сросток, не до конца гидратированные зёрна цементного клинкера и поры [1]. Кристаллический сросток образован сросшимися друг с

другом кристаллами гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (портландита), гидроалюминатов кальция, а также гидросульфоалюмината и гидросульфоферрита кальция.

Тоберморитовый гель, как и природный минерал тоберморит, имеет слоистую структуру, способную адсорбционно связывать значительное количество воды, в том числе проникающей вдоль внутренних плоскостей кристаллов гидросиликатов кальция. В отличие от кристаллического сростка, структура которого образована кристаллизационными (химическими) связями, между кристаллогидратами тоберморитового геля действуют коагуляционные контакты за счёт физических (Ван-дер-Ваальсовых) сил межмолекулярного притяжения, обладающие значительно меньшей прочностью. Особенностью коагуляционных контактов является тиксотропия (способность к обратимому восстановлению связей после разрушения), которая наряду с возможностью сдвига соединённых прослойкой жидкости слоёв друг относительно друга обуславливает способность тоберморитового геля к вязкому течению под нагрузкой.

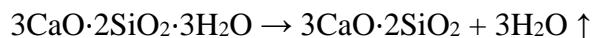
Вследствие перечисленных особенностей строения цементного камня его деформирование под действием приложенного внешнего усилия является вязкоупругим, то есть складывается из упругих деформаций кристаллического сростка и вязких деформаций наполняющего его геля. Вследствие существенно более высокого модуля упругости и прочности кристаллического сростка деформирование цементного камня до того момента, как в сростке начнут появляться микротрешины, оказывается линейным по отношению к приложенной силовой нагрузке и нелинейным по отношению ко времени её действия.

С увеличением возраста бетона часть коагуляционных контактов заменяется кристаллизационными, в результате чего несколько повышается модуль упругости и прочность тоберморитового геля, а вязкие свойства снижаются. Повышение модуля упругости с возрастом пропорционально содержанию цемента в смеси. Наиболее быстро модуль увеличивается в течение первых нескольких месяцев и показывает постоянное увеличение примерно до 3 лет.

Проявление вязких свойств цементного камня значительно усиливается, если его силовое деформирование сопровождается миграцией влаги. Перемещение влаги может происходить как за счёт нагрева, так и восстановления гигрометрического равновесия с окружающей средой. Испарение физически связанной воды (влаги в капиллярах радиусом менее 10^{-7} м) сопровождается процессом усадки, который является обратимым, то есть цементный камень способен также впитывать влагу из атмосферы и восстанавливать свои размеры.

Примечательно также обнаруженное впервые Пикеттом в 1942 году повышение ползучести высыхающего бетона по отношению к аналогичному изолированному от высыхания (эффект Пикетта), причём скорость ползучести возрастает как при удалении влаги, так и при насыщении высушенного бетона влагой, то есть при любом изменении его гигрометрического состояния, и тем в большей степени, чем интенсивнее происходит процесс перемещения влаги [2].

При нагреве последовательность удаления влаги из цементного камня определяется величиной энергии, связывающей воду и твердое вещество: сначала испаряется свободная (несвязанная) вода, затем физически связанная вода (в том числе влага цементного геля), и в последнюю очередь начинается дегидратация – удаление воды, химически связанной с гидратами цемента. Об интенсивности удаления воды с ростом температуры нагрева позволяют судить кривые потери массы образцов [3] (рис. 1), из которых видно, что начальная влажность перестаёт оказывать влияние при температурах выше 250°C . К кривым потери влажности по форме близка приведенная у Harmathy [13] кривая, показывающая степень дегидратации тоберморитового геля (рис. 2):



Это позволяет полагать, что процесс удаления физически связанной влаги при нагреве происходит в главной степени за счёт гелевой воды, начинается практически с самого начала нагрева и продолжается до температуры 760°C, при которой происходит модификационное превращение геля с уменьшением объёма на 10%. Вследствие слоистой структуры геля его дегидратация сопровождается усадкой и уплотнением, что повышает его прочность.

Интенсивное перемещение влаги на первых этапах нагрева приводит к повышению порового давления, которое складывается с напряжениями от внешней нагрузки и заметно (на 30-35%) снижает прочность цементного камня. На кривой зависимости прочности цементного раствора от температуры [7] (рис. 3) это отражается в виде характерного «провала» в интервале температур 20-200°C.

При дальнейшем росте температуры (200-350°C) прочность восстанавливается и даже может превышать первоначальную (обычно не более чем на 25%) благодаря дополнительной гидратации минералов цементного клинкера – в условиях высокой локальной влажности, температуры и давления инициируется процесс «самозапарки», называемый также внутренним автоклавированием (internal autoclaving) [14]. Степень повышения прочности будет зависеть от минералогического состава цемента, его степени гидратации, соотношения CaO/SiO₂ (или C/S, моль извести на моль кремнезема), количества мелких частиц (кварца или микрокремнезема), достигнутой температуры нагрева и уровня порового давления [15].

При отношении C/S в исходных компонентах около 1,5 и выше при росте температуры от 100 до 200°C образуется слабый гидрат C₂S (также называемый C₂SH(A)) с уменьшенными силами сцепления (Ван-дер-Ваальса); при отношении C/S менее 1,5 образуется прочный гель тоберморита. При подборе состава бетона важно обеспечить низкое отношение C/S, что достигается добавлением кремнезема в реактивной форме в соответствующих количествах [16].

Дальнейшая потеря гелевой воды к образованию более коротких и прочных силоксановых связей (Si-O-Si) с более высокой поверхностной энергией, тем самым способствуя усадке (уплотнению) и увеличению прочности [17].

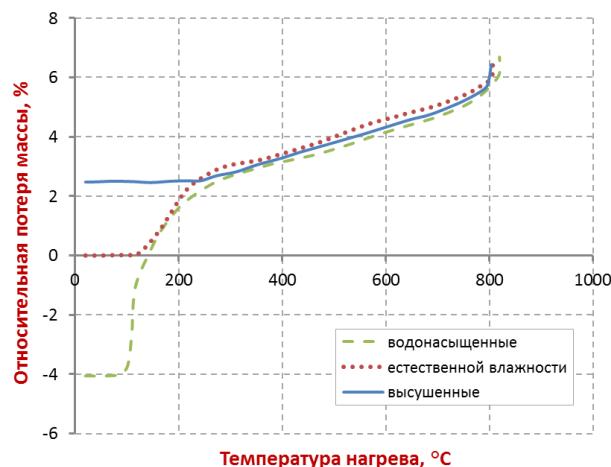


Рисунок 1 – Потеря массы бетонных образцов различной начальной влажности при нагреве (Anderberg, 1976) [3]

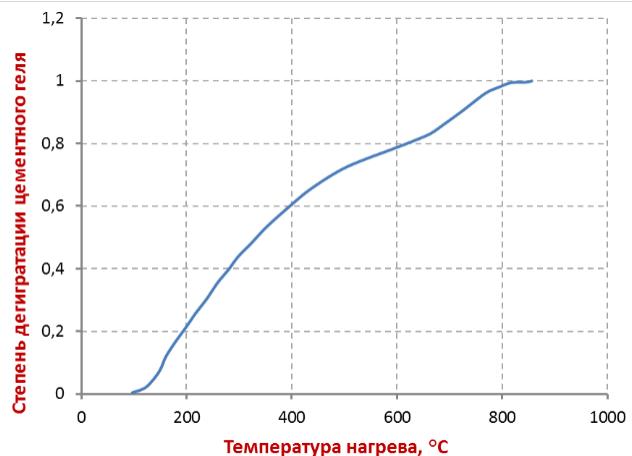
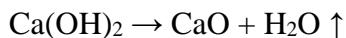


Рисунок 2 – Дегидратация цементного геля с ростом температуры нагрева (Harmathy, 1970) [13]

Исследование микроструктурных изменений нагретого цементного камня методом нейтронографии (neutron diffraction) [17] позволяет определить температуру, при которой происходит дегидратация основных составляющих цементного камня. При нагреве первым разлагается этtringит – ещё до того, как температура достигнет 100°C.

Дегидратация минералов кристаллического сростка начинает заметно проявляться при нагреве свыше 350°C. Она сопровождается интенсивным развитием повреждений – разрыхлением, образованием трещин и пустот, что приводит к снижению прочности цементного камня. В интервале температур 520...590°C происходит дегидратация алюмината кальция С3А. При 400...600°C происходит дегидратация основного минерала кристаллического сростка – гидроксида кальция (портландита), и наиболее высокая её скорость приходится на 535°C [13, 18]:



Образующаяся в результате этой реакции свободная известь CaO при охлаждении будет гидратироваться атмосферной влагой с увеличением объёма более чем на 40%, что обычно приводит к дальнейшему развивающемуся самопроизвольному разрушению элементов, изготовленных из портландцемента.

В тяжёлом бетоне применяются в основном два вида заполнителей – силикатные (или кремнистые, представленные минералами из горных изверженных пород, содержащих кварц – гранит, кварцит и др.), и карбонатные (из осадочных пород – известняк CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , доломит $\text{MgCO}_3/\text{CaCO}_3$, аортозит и др.). Гранитный заполнитель при температурах 200...400°C повышает прочность примерно вдвое из-за снятия внутренних напряжений от неравномерного охлаждения расплавленной магмы. Однако при температуре 573°C происходит модификационное (кристаллическое) превращение кварца со скачкообразным увеличением объёма на 2,4%, что приводит к резкому снижению прочности. Превращение является эндотермическим и обратимым. При 800°C гранит распадается на составляющие (кварц, полевой шпат и слюду) и происходит второе модификационное превращение кварца с увеличением объёма на 12,7%. Температура плавления гранита составляет 1210...1250°C, а базальта – 1050°C, что сопровождается газовыделением и расширением.

Известняковый заполнитель по сравнению с гранитным сохраняет более высокую прочность при нагреве. При 600...700°C начинается частичная диссоциация углекислого кальция, скорость которой зависит от содержания SiO_2 в известняке [19], при 900°C она завершается разрыхлением структуры:



Искусственные заполнители (доменный шлак, керамзит, перлит и др.), применяемые в лёгких бетонах, являются наиболее стойкими к нагреву, так как в процессе производства подвергаются значительным термическим воздействиям.

Стойкость заполнителей к нагреву, выражаясь в отсутствии значительных термических деформаций (в том числе остаточных) и фазовых превращений характеризуется у Г.А. Хюри обобщающим свойством «термическая стабильность заполнителей» (thermal stability of aggregates) [10].

Снижение прочности контактного слоя между цементным камнем и заполнителем вызвано термической несовместимостью между ними: при повышении температуры заполнители расширяются, а цементный камень испытывает усадку (рис. 4). Интенсивность нарушения прочности контактного слоя зависит от способности заполнителей к термическому расширению, от содержания крупного заполнителя (Щ/Ц), его пористости, крупности и характера (шероховатости) поверхности [10]. Наибольшими температурными деформациями обладает щебень из песчаника, гранита и кварцита, наименьшими – щебень из известняка и базальта.

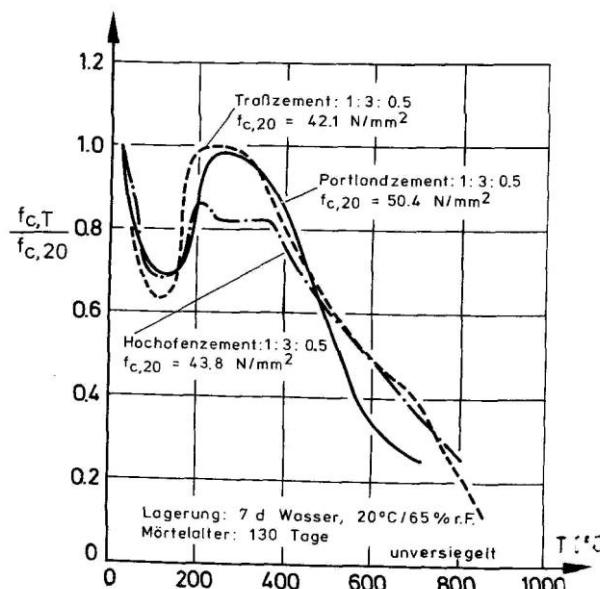


Рисунок 3 – Изменение прочности образцов из цементно-песчаного раствора с ростом температуры (Schneider, 1982) [7]

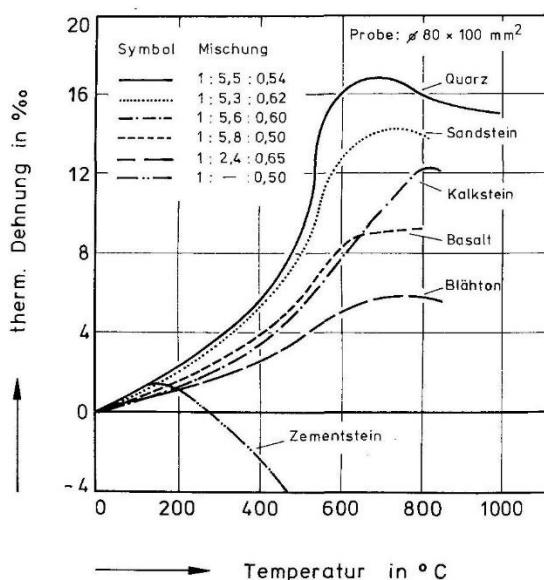


Рисунок 4 – Свободные температурные деформации цементного камня и заполнителей (Schneider, 1982) [7]

3. Результаты исследования и их анализ

Стадии потери прочности бетона повторяют особенности поведения цементного камня [20]: (1) – начальная стадия потери прочности; (2) – стадия стабилизации и восстановления – от 100-250 °C до 400-450°C (характерна как для бетона нормальной массы, так и легкого бетона); (3) – стадия постоянной потери прочности. Для высокопрочного бетона сохраняются те же тенденции, что и для бетона нормальной прочности, однако потеря прочности в диапазоне от 20 до 450 °C заметно выше [20].

Основные причины снижения прочности бетона: (1) – термическая деструкция заполнителя; (2) – ослабление сцепления цементного камня с заполнителем; (3) – разупрочнение цементного камня за счет увеличения пористости при обезвоживании.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на снижение прочности бетона, являются: (1) – тип заполнителя; (2) – его количественное содержание; (3) – наличие приложенной нагрузки. Впервые это наглядно продемонстрировал в 1956 году в своем экспериментальном исследовании Malhotra H.L. [6], рис. 5. Чем более термически стабилен заполнитель и чем больше его относительное содержание в бетоне, тем меньше снижение прочности.

Решающая роль заполнителя вполне ожидаема, так как заполнитель занимает 60-75% объема бетона. Влияние вида заполнителя во многом объясняется устойчивостью свойств контактного слоя вследствие уменьшения разности температурных деформаций цементного камня и заполнителя: чем меньше температурное расширение заполнителя, тем медленнее снижается прочность. Бетон на гранитном заполнителе при нагреве снижает прочность более сильно, чем бетон с известняковым заполнителем и легким заполнителем. В отношении влияния количественного содержания заполнителя можно предположить, что при увеличении содержания заполнитель как более жесткий компонент воспринимает более значительную долю напряжений от внешнего усилия, разгружая тем самым цементный камень. Образцы, нагревавшиеся под нагрузкой, показывают меньшее снижение прочности (этот эффект будет обсуждаться ниже).

Влияние на прочность бетона остальных факторов, как показали последующие исследования [8,21,22], оказывается не столь значительным. В числе этих факторов: (1) – исходная прочность бетона, если речь идет о бетонах нормальной прочности; (2) – тип цемента; (3) – водоцементное отношение В/Ц; (4) – максимальная крупность заполнителя; (5) – скорость нагрева или время изотермической выдержки (наибольшая часть потери прочности

происходила в первые 2 часа); (6) – возраст бетона, если речь идёт о возрасте адекватного отверждения.

Прочность бетона при растяжении в условиях нагрева долгое время не являлась предметом столь пристального исследования, как прочность при сжатии, поскольку не имеет решающего значения для прогноза прочности сечений. Однако к настоящему времени накоплен уже достаточно большой объём данных о снижении прочности при растяжении, которые подробно рассмотрены в обзоре Van der Merwe [9].

В качестве наиболее важных закономерностей можно назвать следующие: (1) – прочность на растяжение при нагреве снижается более сильно, чем прочность на сжатие того же бетона; (2) – прочность на растяжение снижается примерно линейно в интервале температур от 20 до 600°C; (3) – прочность на растяжение оказывается более чувствительной к влиянию содержания влаги. Тип заполнителя и его количественное содержание влияют на прочность при растяжении так же существенно, как и на прочность при сжатии.

В отличие от прочности на сжатие, которая может сохраняться или даже превышать первоначальную в интервале температур до 350°C, все виды бетонов показывают быструю потерю модуля упругости уже с самого начала нагрева (рис. 6). График снижения модуля упругости бетона представляет собой плавно ниспадающую линию, без скачков и площадок, характерных для кривой снижения прочности.

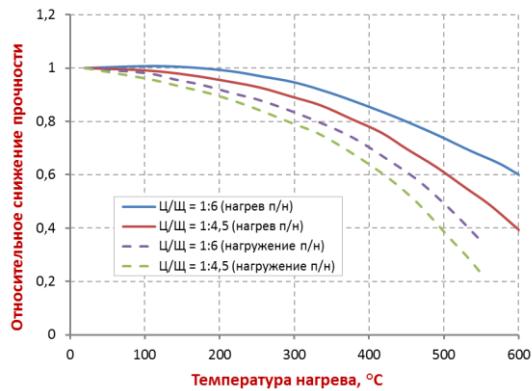


Рисунок 5 – Влияние количественного содержания заполнителя и наличия приложенной нагрузки на снижение прочности бетона при нагреве (Malhotra, 1956) [6]

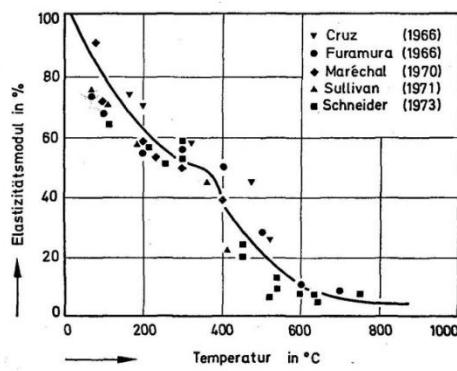


Рисунок 6 – Снижение модуля упругости бетона при нагреве (Schneider, 1982) [7]

В то время как причины снижения прочности бетона при нагреве исследованы и описаны достаточно хорошо, столь же убедительного изложения причин, по которым снижается модуль упругости, в доступной литературе найти не удалось.

Анализируя форму кривой снижения модуля упругости бетона с ростом температуры, можно предположить, что решающее влияние здесь оказывает удаление воды, поскольку график хотя и не полностью, но во многом повторяет кривые обезвоживания цементного геля (см. рис. 2). Связь модуля упругости с содержанием влаги в бетоне подтверждает также тот факт, что при нормальной температуре влажные образцы имеют более высокие значения модуля, чем более сухие.

Модуль упругости бетона может быть определён как аддитивная функция модулей упругости составляющих его компонентов, которые складываются пропорционально занимаемому объёму. В итоге модуль упругости бетона повышается с увеличением жёсткости заполнителя и содержания цемента (уменьшения В/Ц).

Основные факторы, влияющие на снижение модуля упругости бетона остаются теми же, что и для прочности на сжатие – это тип заполнителя, его количественное содержание и наличие приложенной нагрузки. Известняковый бетон имеет меньшие потери модуля упругости, чем бетон на кремнистом заполнителе, а у легкого бетона жесткость не снижается так сильно, как у бетона нормального веса. Прочие факторы (исходная прочность бетона,

водоцементное отношение В/Ц, тип цемента, скорость нагрева, продолжительность выдержки, возраст при испытании) существенного влияния не оказывают [5].

Обобщённой характеристикой прочностных и деформативных свойств бетона является диаграмма «напряжения-деформации». В доступных источниках имеется достаточно ограниченное количество экспериментальных кривых «напряжения-деформации» при нагреве: Furamura [23], Anderberg [3], Schneider [7, 8], Purkiss [12, 24], Khouri [25].

Кроме прочности и начального модуля анализ диаграмм позволяет оценить такие важные параметры как кривизна ветвей и пиковые деформации (деформации в вершине). Здесь опять оказывают влияние вид и содержание заполнителя: чем сильнее снижается прочность при той же температуре, тем сильнее кривизна нисходящей и восходящей ветвей.

Полностью судить об упругих свойствах бетона позволяют лишь деформации на ветвях разгрузки, но таких диаграмм при нагреве, кроме представленных Furamura [23], в доступной литературе пока нет.

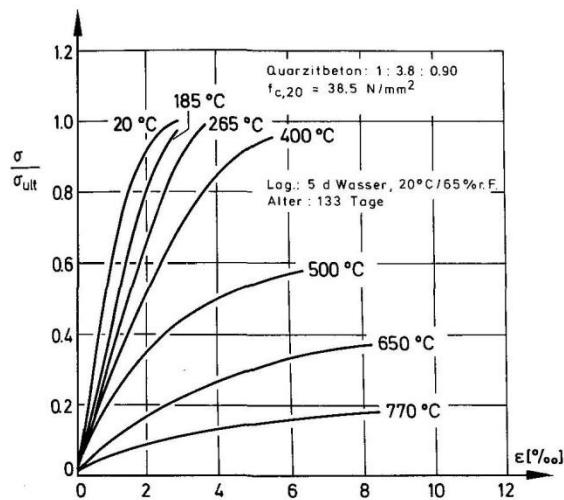


Рисунок 7 – Диаграммы «напряжения-деформации» бетона, нагружение после нагрева, постоянная скорость роста напряжений (Anderberg, 1976) [3]

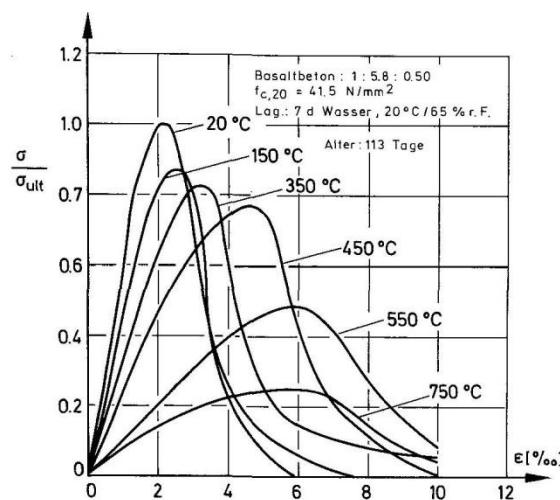


Рисунок 8 – Диаграммы «напряжения-деформации» бетона, нагружение после нагрева, постоянная скорость роста деформаций (Schneider, 1982) [7]

Свободные температурные деформации экспериментально определяются как деформации ненагруженного бетона во время первого нагрева. Последующее охлаждение бетона позволяет выделить в структуре этих деформаций обратимый компонент (рис. 9). Он включает в себя как тепловое расширение, так и увеличение объёма вследствие модификационных превращений кристаллической решётки, и в общем случае меняется нелинейно по отношению к температуре и скачкообразно.

Оставшийся необратимый после охлаждения компонент представлен деформациями усадки, которые можно выделить лишь теоретически с помощью эффективного напряжения [26] и деформациями, возникшими вследствие термохимического повреждения структуры в процессе нагрева (рис. 10). Таким образом, свободные температурные деформации бетона отражают закономерности не только теплового расширения компонентов, но также испарения влаги и снижения прочности бетона, однако практически установить эту связь и применять в практическом моделировании пока по-прежнему затруднительно.

При нагреве, как уже отмечалось, заполнители расширяются, а цементный камень даёт усадку. Поскольку заполнитель составляет большую часть объёма бетона, он в первую очередь влияет на результирующие деформации: чем больше расширяется заполнитель, тем больше расширяется и бетон. Термическое расширение бетона на силикатном заполнителе больше, чем у известнякового бетона. Базальт из-за своей мелкокристаллической структуры имеет меньшее расширение, чем гранитный заполнитель. Наименьшие значения температурных деформаций у бетона на лёгких (мягких) заполнителях.

Поскольку цементный камень на начальных этапах нагрева также демонстрирует расширение, начальное содержание влаги в этом интервале температур также оказывает влияние и бетон с более высокой начальной влажностью показывает большее расширение.

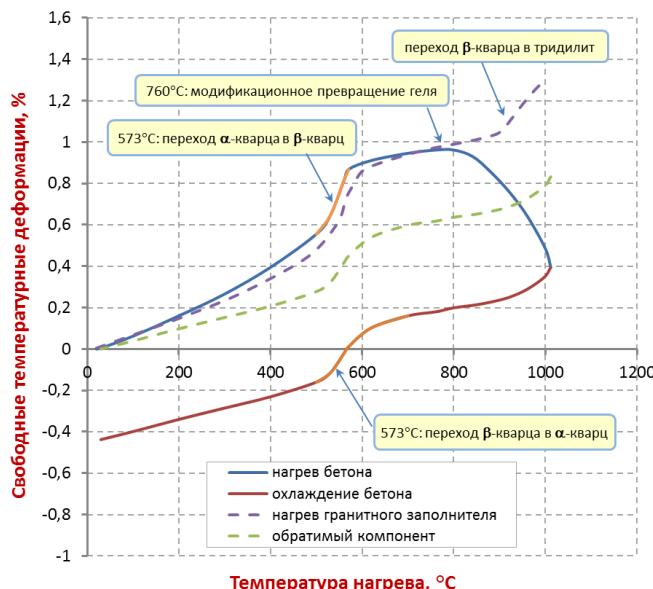


Рисунок 9 – Связь свободных температурных деформаций бетона с модификационными превращениями гранитного заполнителя [11]

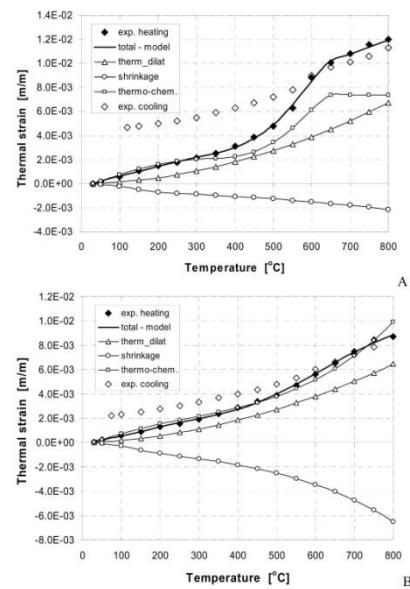


Рисунок 10 – Разделение компонентов свободных температурных деформаций бетона (Gawin, 2004) [26]

Практически все экспериментальные исследования показали, что прочность бетона, нагретого под нагрузкой, выше или равна прочности бетона, нагретого без нагрузки. Это объясняется как минимум двумя причинами: (1) – под действием приложенной до нагрева нагрузки образуются направленные трещины, облегчающие миграцию влаги, что препятствует повышению порового давления; (2) – приложенное сжимающее напряжение уменьшает негативное влияние термической несовместимости между заполнителем и матрицей цементного камня, препятствуя деформациям теплового расширения заполнителей, что снижает общую повреждённость бетона при нагреве [24]. Гипотеза подтверждается также измерением плотности остаточных трещин после охлаждения образцов [12].

Однако в объяснении причин повышения деформативности при нагреве нагруженного бетона среди исследователей не сложилось столь единого мнения. Во многом причиной тому стало определение Хюри [25], который назвал всю силовую деформацию, возникающую в бетоне с самого начала нагрева, Load-Induced-Thermal-Strain (LITS), включив в это понятие не только компонент, который проявляется у бетона, нагретого без нагрузки, но также и переходный компонент, характерный для нагрева нагруженного бетона. В итоге, пытаясь объяснить «происхождение LITS», авторы рассматривают взаимодействие различных механизмов, таких как перенос влаги и развитие повреждений, но в результате не складывается общепринятое и непротиворечивое изложение возможных источников переходного компонента.

Наиболее убедительная гипотеза дана в исследовании Bažant и Chern [27], которые впервые предположили, что переходная тепловая ползучесть (или LITS) вызвана микродиффузией влаги, которая перемещается из микропор в макропоры, удаляет часть твердого материала, создавая микроповреждения.

Термин «микроповреждения» здесь следует применять с особой осторожностью, поскольку вполне очевидно, что любое повреждение структуры должно приводить к снижению прочности материала. Однако при нагреве бетона в нагруженном состоянии, как

отмечалось выше, его прочность обычно не показывает более сильного снижения, чем при нагреве без нагрузки.

В то же время, если не пытаться объяснить «происхождение LITS» в целом, а сфокусировать внимание на объяснении природы только переходного компонента, физическая картина выстраивается вполне реалистично. Переходный компонент деформации, который добавляется к силовой деформации бетона при нагреве в нагруженном состоянии, аналогичен «ползучести при высыхании» – дополнительному компоненту, возникающему за счёт переноса влаги в бетоне. Он имеет с «ползучестью при высыхании» общую природу, состоящую в превращении гелевой воды в поровую, благодаря чему упрощается скольжение слоёв геля при действии нагрузки, поэтому его вполне можно называть ползучестью.

Однако в сложившихся представлениях ползучесть – это эффект, который проявляется во времени. В случае высыхания дополнительный прирост деформации ползучести зависит от количества мигрировавшей влаги, а скорость ползучести – от скорости её переноса, зависящей от разности потенциалов влажности и размеров образца. Здесь управляющим фактором является время. В случае нестационарного нагрева процесс происходит точно так же, но управляющим фактором является температура. Поэтому деформации переходной термической ползучести оказываются не зависящими от времени; количество перенесённой влаги определяется только температурой, если оставаться в диапазоне скоростей и интервалов выдержки при кратковременном нагреве.

Что же касается развития повреждений, то этот процесс происходит в структуре бетона как при нагреве под нагрузкой, так и при нагружении после нагрева, и его следует рассматривать в контексте изменения прочности.

Интересным остаётся также вопрос о том, как влияет нагрев в нагруженном состоянии на модуль упругости бетона, то есть на величину деформаций, являющихся обратимыми при достигнутой температуре после разгрузки. Несмотря на то, что прочность бетона, нагревавшегося в нагруженном состоянии, исследуется с 1956 года, диаграммы «напряжения–деформации», полученные после разгрузки нагретого бетона и последующего нагружения, приводятся всего в трёх источниках [8, 12, 25].

Имеющиеся на данный момент опытные данные позволяют утверждать, что нагрев в условиях приложенной нагрузки значительно повышает модуль упругости; он практически перестаёт снижаться с ростом температуры. Однако уровень нагружения оказывает влияние здесь только до тех пор, пока меняется от нуля до 30%, далее его влияние незначительно. Имеющийся набор опытных данных недостаточен для широких обобщений, но понимать объяснение причин, по которым упругие свойства нагретого под нагрузкой бетона практически не снижаются, в любом случае было бы интересно. При формулировании рабочей гипотезы будем придерживаться концепции совместного деформирования тоберморитового геля и кристаллического сростка в цементном камне как композиционном материале, и тогда повышение модуля упругости объясняется вполне легко. При нагреве без нагрузки часть деформаций сдвига слоёв тоберморитового геля реализовалась, а часть осталась, и гель участвует в восприятии нагрузки, снижая упругие свойства цементного камня. При нагреве под нагрузкой все деформации сдвига тоберморитового геля, какие только возможны при достигнутой температуре, реализовались, и он перестаёт участвовать в восприятии нагрузки. Все усилия воспринимаются теперь упругим и более жёстким каркасом кристаллического сростка. По-видимому, именно по этой причине модуль упругости бетона оказывается практически равен начальному до нагрева, а возможно, в некоторой незначительной степени даже превосходит его.

4. Заключение

1. Анализ показал, что результаты испытаний, полученные по различным методикам, необходимо различать. Важнейшим требованием при выборе методики испытания должно являться создание условий, наиболее близко соответствующих реальной работе бетона в конструкциях при пожаре.

2. Проведённый анализ проявлений реакции бетона на термосиловое воздействие показал, что в её основе лежат два принципиально различных механизма: термомеханический, состоящий в повреждении структуры и снижения прочности материала, и термовлажностный, состоящий в изменении деформативных свойств материала вследствие испарения влаги из тоберморитового геля цементного камня. Если различать вклад каждого из этих механизмов при объяснении происходящих процессов, удаётся получить вполне реалистичную физическую картину сопротивления бетона совместному действию кратковременного нагрева и механического нагружения.

3. Понимание реакции бетона на термосиловое воздействие является основой построения расчётной модели, в которой в виде мотивированно сформулированных предпосылок должно быть учтено действие каждого из выявленных механизмов и определены характеризующие их количественные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
2. Bazant Z.P., Xi Y. Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms // Materials and Structures. 1994. Vol. 27. pp. 3-14.
3. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
4. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review // Construction and Building Materials. 2021. 270.121398.
5. Hager I. Behaviour of Cement Concrete at High Temperature // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2013. Vol. 61. No. 1. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
6. Malhotra H.L. The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // Magazine of Concrete Research. 1956. Vol. 8. No. 3. pp. 85-94.
7. Schneider U. Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (Behaviour of Concrete at High Temperatures). Heft 337 des Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
8. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review // Fire Safety Journal. 1988. No. 13. pp. 55-68.
9. Van der Merwe J.E. Evaluation of Concrete Tensile Strength as a Function of Temperature // Construction and Building Materials. 2022. No. 329. 127179.
10. Khoury G.A. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment // Magazine of Concrete Research. 1992. Vol. 44. No. 161. pp. 291–309.
11. fib Bulletins No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling. State-of-art Report. 2007. 105 p.
12. Purkiss J.A., Long-Yuan Li. Fire Safety Engineering Design of Structures. 2013. CRC Press Publ., 3rd edition. 442 p.
13. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // Journal of Materials. 1970. No. 5. Pp. 47-74.
14. Verbeck G., Copeland L.E. Some Physical and Chemical Aspects of High Pressure Steam Curing / Menzel Symposium on High Pressure Steam Curing. ACI SP-32. 1972. pp. 1-131.
15. Piasta J. Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste // Materials and Structures. 1989. Vol. 17. No. 102, pp. 415-420.
16. Kottas R., Seeberger J., Hisdorf H. Strength characteristics of concrete in the temperature range 20°C to 200°C / Paper H1/2. 5th SMIRT Int. Conference, Berlin, 1979.
17. Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillas X., Campoc J. Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes Upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction // Cement and Concrete Research. 2004. No. 34. pp. 1633-1644.
18. Quon D.H.H. Phase Changes in Concrete Exposed to Sustained High Temperatures / Division Report MRP/MSL 80-111(TR), Mineral Sciences Laboratories, CAANMET. Ottawa, Canada, 1980.
19. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes // Journal of American Concrete Institute. 1973. No. 70. Pp. 132–142.

20. Phan L.T. Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the Art / NISTIR 5934. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 1996. 105 p.
21. Schneider U. Properties of Materials at High Temperatures – Concrete / RILEM Committee 44-PHT. Kassel Universität, Germany. 1985.
22. Fire Design of Concrete Structures – In Accordance With CEB/FIP Model Code 90 / Comité Euro International Du Beton. CEB Bulletin D'Information No. 208. Switzerland, July 1991.
23. Furamura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures // Transactions of the Architectural Institute of Japan, Abstract No 7004. 1966. p. 686.
24. Purkiss J.A., Bali A. The transient behaviour of concrete at temperature up to 800°C / Proceedings of the 10th Ibausil, Section 2/1. Hochschule fur Architektur und Bauwesen, Weimar. 1988. pp. 234–239.
25. Khoury G.A. Majorana C.E., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of heated concrete // Magazine of Concrete Research. 2002. Vol. 54. No. 2. pp. 77-101.
26. Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures // Materials and Structures. 2004. Vol. 37. No. 268. pp. 218-236.
27. Bažant Z.P., Chern J.C. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism // Materials and Structures. 1985. Vol. 18. No.103. pp. 1-20.

REFERENCES

1. Sheykin A.Ye., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov (Structure and properties of cement concrete). – M.: Stroyizdat, 1979. – 344 s.
2. Bazant Z.P., Xi Y. Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms // *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27. pp. 3-14.
3. Anderberg Y., Thelandersson S. Stress and Deformation Characteristics of Concrete: Part 2 - Experimental Investigation and Material Behavior Model. Bulletin 54. Lund Institute of Technology, Sweden. 1976. 85 p.
4. Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review // *Construction and Building Materials*. 2021. 270.121398.
5. Hager I. Behaviour of Cement Concrete at High Temperature // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. No. 1. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013
6. Malhotra H.L. The Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete // *Magazine of Concrete Research*. 1956. Vol. 8. No. 3. pp. 85-94.
7. Schneider U. Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen (Behaviour of Concrete at High Temperatures). Heft 337 des Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Munich, Germany, 1982.
8. Schneider U. Concrete at High Temperatures – a General Review // *Fire Safety Journal*. 1988. No. 13. pp. 55-68.
9. Van der Merwe J.E. Evaluation of Concrete Tensile Strength as a Function of Temperature // *Construction and Building Materials*. 2022. No. 329. 127179.
10. Khoury G.A. Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment // *Magazine of Concrete Research*. 1992. Vol. 44. No. 161. pp. 291–309.
11. fib Bulletins No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling. State-of-art Report. 2007. 105 p.
12. Purkiss J.A., Long-Yuan Li. Fire Safety Engineering Design of Structures. 2013. CRC Press Publ., 3rd edition. 442 p.
13. Harmathy T.Z. Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures // *Journal of Materials*. 1970. No. 5. Pp. 47-74.
14. Verbeck G., Copeland L.E. Some Physical and Chemical Aspects of High Pressure Steam Curing / Menzel Symposium on High Pressure Steam Curing. ACI SP-32. 1972. pp. 1-131.
15. Piasta J. Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste // *Materials and Structures*. 1989. Vol. 17. No. 102. pp. 415-420.
16. Kottas R., Seeberger J., Hisdorf H. Strength characteristics of concrete in the temperature range 20°C to 200°C / Paper H1/2. 5th SMIRT Int. Conference, Berlin, 1979.
17. Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillas X., Campoc J. Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes Upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction // *Cement and Concrete Research*. 2004. No. 34. pp. 1633-1644.
18. Quon D.H.H. Phase Changes in Concrete Exposed to Sustained High Temperatures / Division Report MRP/MSL 80-111(TR), Mineral Sciences Laboratories, CAANMET. Ottawa, Canada, 1980.
19. Harmathy T.Z., Allen L.W. Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes // *Journal of American Concrete Institute*. 1973. No. 70. Pp. 132–142.

20. Phan L.T. Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the Art / NISTIR 5934. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 1996. 105 p.
21. Schneider U. Properties of Materials at High Temperatures – Concrete / RILEM Committee 44-PHT. Kassel Universität, Germany. 1985.
22. Fire Design of Concrete Structures – In Accordance With CEB/FIP Model Code 90 / Comité Euro International Du Beton. CEB Bulletin D'Information No. 208. Switzerland, July 1991.
23. Furamura F. Stress-strain Curve of Concrete at High Temperatures // Transactions of the Architectural Institute of Japan, Abstract No 7004. 1966. p. 686.
24. Purkiss J.A., Bali A. The transient behaviour of concrete at temperature up to 800°C / Proceedings of the 10th Ibausil, Section 2/1. Hochschule fur Architektur und Bauwesen, Weimar. 1988. pp. 234–239.
25. Khoury G.A. Majorana C.E., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of heated concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2002. Vol. 54. No. 2. pp. 77-101.
26. Gawin D., Pesavento F., Schrefler B.A. Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. No. 268. pp. 218-236.
27. Bažant Z.P., Chern J.C. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism // *Materials and Structures*. 1985. Vol. 18. No.103. pp. 1-20.

Информация об авторах:

Федоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
академик Российской академии архитектуры и строительных наук, докт. техн. наук, проф., заведующий кафедрой
«Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Левитский Валерий Евгеньевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Information about authors:

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
Academician of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Building Construction, Buildings and Structures
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Levitsky Valery E.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Building Construction, Buildings and Structures,
E-mail: dobriy_vecher@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025
Одобрена после рецензирования 21.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 18.11.2025
Approved after reviewing 21.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025

О.В. ВОЛИЧЕНКО^{1,2,3}, И.П. ЧЕЧЕЛЬ³

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Российский университет Дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)»; г. Белгород, Россия

РЕНОВАЦИЯ ЗДАНИЙ ШКОЛ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПОЛНОГО ДНЯ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Аннотация. В работе рассматриваются здания общеобразовательных школ действующего школьного фонда Белгородской области, нуждающиеся в реновации для формирования на их основе современных полнодневных образовательных комплексов нового поколения. Расцвет школьное строительство в регионе получило в 1960-1980 годах, в это время особенно интенсивно строились новые школы на сельских территориях. Сегодня здания морально устарели, за последнее время часть из них была подвергнута модернизации или капитально отремонтирована, однако многие продолжают работать в прежнем виде, что не соответствует предъявляемым сегодня требованиям к организации образовательной деятельности, включая внеурочную составляющую. Материально-техническая база зданий школ и их устаревшая пространственная среда не располагают необходимыми условиями и ресурсом площадей для расширения внеурочной функции. Существует противоречие между запросом потребителей к содержательной части и условиям получения основных и дополнительных образовательных услуг в школе и ограниченными возможностями архитектурно-планировочной структуры действующих школьных зданий. Это противоречие является характерной проблемой как для Белгородской области, так и для других регионов РФ — необходим переход от монофункциональной школы к многофункциональному образовательному комплексу полного дня. С целью решения проблемы изучены приемы и методы реновации морально устаревших зданий школ, определены основные тенденции в проектировании и строительстве школ (на основе мирового опыта). Анализ существующей типологии региональных школ позволил выявить основные композиционные схемы зданий, необходимые для проектирования дополнительных блок-модулей внеурочных центров и введения их в структуру новых комплексов при выполнении работ по реновации. Целесообразность внедрения альтернативных функций в монофункциональное здание школы обусловлена современными тенденциями в развитии архитектуры общеобразовательных зданий и комплексов полного дня и социологическими исследованиями, проведенными в рамках данной работы. К обсуждению предлагается разработанная с опорой на модульный подход и с учетом сложившейся типологии зданий регионального фонда, стратегия реновации школ в образовательные комплексы полного дня; предложен вариативный ряд, функциональная и архитектурно-планировочная организация блок-модулей внеурочных центров с использованием элементов устойчивой архитектуры; предложено экспериментальное проектное решение образовательного комплекса полного дня с блок-модулями внеурочных центров различной направленности. Стратегия реновации, предлагаемая авторами работы, позволит быстро и качественно видоизменить, и модернизировать действующие здания школ, что особенно важно в условиях утраты значительной части регионального фонда и представляет собой наиболее короткий путь для перехода от устаревшей к современной архитектуре образовательных комплексов нового поколения.

Ключевые слова: региональный фонд школьных зданий, стратегия реновации, модульный подход, блок-модуль, внеурочный центр, образовательный комплекс полного дня.

O.V. VOLICHENKO^{1,2}, I.P. CHECHEL³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU); Moscow, Russia

² P. Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); Moscow, Russia

³ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia

RENOVATION OF SCHOOL BUILDINGS TO FULL-TIME EDUCATIONAL COMPLEXES (USING THE EXAMPLE OF THE BELGOROD REGION)

Abstract. The paper considers the buildings of secondary schools of the current school fund of the Belgorod region, which need renovation to form modern full-day educational complexes of a new generation on their basis. School construction in the region flourished in the 1960s and 1980s, during which time new schools were built especially intensively in rural areas. Today, the buildings are outdated, and recently some of them have been modernized or overhauled, but many continue to operate as they were, which does not meet the current requirements for organizing educational activities, including extracurricular activities. The material and technical base of school buildings and their outdated spatial environment do not have the necessary conditions and space resources to expand the extracurricular function. There is a contradiction between consumers' demands for the content and conditions for obtaining basic and additional educational services at school and the limited possibilities of the architectural and planning structure of existing school buildings. This contradiction is a characteristic problem both for the Belgorod region and for other regions of the Russian Federation — a transition from a monofunctional school to a multifunctional full-time educational complex is necessary. In order to solve the problem, techniques and methods of renovation of obsolete school buildings have been studied, and the main trends in school design and construction have been identified (based on international experience). The analysis of the existing typology of regional schools made it possible to identify the main compositional schemes of buildings necessary for the design of additional block modules of extracurricular centers and their introduction into the structure of new complexes during renovation work. The expediency of introducing alternative functions into a monofunctional school building is due to current trends in the development of architecture in general education buildings and full-time complexes and sociological research conducted within the framework of this work. A strategy for the renovation of schools into full-day educational complexes, based on a modular approach and taking into account the established typology of buildings of the regional fund, is proposed for discussion; a variable range, functional and architectural planning organization of block modules of extracurricular centers using elements of sustainable architecture is proposed; an experimental design solution for a full-day educational complex with block modules is proposed extracurricular centers of various types. The renovation strategy proposed by the authors of the work will make it possible to quickly and efficiently modify and modernize existing school buildings, which is especially important in the context of the loss of a significant part of the regional fund and represents the shortest path for the transition from outdated to modern architecture of new-generation educational complexes.

Keywords: regional school building fund, renovation strategy, modular approach, block module, extracurricular center, full-day educational complex.

1. Введение

За период с 1995 по 2024 гг. школьный фонд Белгородской области претерпел значительные изменения в рамках оптимизационных процессов в региональном народно-хозяйственном комплексе. В 1995 г. в него входили 842 школы, к 2000 г. их количество сократилось до 820¹, а по состоянию на январь 2024 г. в области функционировало 545 общеобразовательных организаций². За этот период фонд уменьшился на 297 школы, что

¹ Белгородская область в цифрах. Краткий статистический сборник. URL: <https://31.rosstat.gov.ru> (дата обращения 10.05.2025)

² Государственная аккредитация образовательной деятельности. Итоги-2023. Министерство образования Белгородской области. URL: <https://obr.belregion.ru/press-centr/novosti/belgorodskaya-obl-gosudarstvennayaakkreditaciya/> (дата обращения 10.05.2025)

составляет 35,3% от первоначального показателя. Особенно сильно сокращение затронуло сельские малокомплектные школы. Многие школьные здания были перепрофилированы или утрачены. Такое существенное сокращение привело к негативным последствиям, одним из которых является обучение во 2-ю смену¹ и отсутствие условий для реализации программ основного и дополнительного образования, в соответствии с современными стандартами. Есть основания полагать, что количество школ продолжит уменьшаться в связи с последствиями военных атак со стороны сопредельного государства на приграничные районы области.

Количество государственных организаций дополнительного образования (ДО) для детей также сокращалось, многие здания, в которых они располагались, за эти годы, как и здания школ, были перепрофилированы или утрачены полностью. Это сокращение частично было компенсировано появлением небольших частных организаций, которые предоставляют услуги локального характера, например, по подготовке детей к школе, изучению иностранных языков, организации присмотра за детьми или проведению детских праздников. Услуги широкого спектра характерны для немногочисленных крупных организаций ДО городского и районного значения, которые расположены в центральной части крупных городов или районных центров, как, например, «Белгородский областной Дворец детского творчества» (г. Белгород).

Особенно остро вопрос об организации образовательной деятельности был поставлен после 2012г., когда были принятые Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» № 273-ФЗ от 29.12.2012г. и федеральные государственные образовательные стандарты, в которых значимое место занимают вопросы организации внеурочной деятельности в общеобразовательной школе.

Для исправления сложившейся ситуации необходимо не только ликвидировать накопившиеся проблемы, но и выйти на новый уровень организации современной региональной школы. Для этого Правительством Белгородской области принят ряд государственных законов и программ [1].

Необходимо осуществить переход школ в новое качественное состояние образовательного комплекса модели полного дня, который сегодня в наибольшей степени способен реализовать положения нормативно-правовых документов федерального² и регионального³ уровней в области общего образования. Однако сложность такого перехода определяется рядом проблем, связанных с устаревшей материально-технической базой и сложившейся архитектурой школьных зданий: они располагают ограниченным набором помещений для организации кружковой работы и групп продленного дня, предусмотренных советскими типовыми или индивидуальными проектами переходного федеративного периода; отмечается недостаточная взаимосвязь между организациями основного и дополнительного образования, что также затрудняет организацию работы школы полного дня; отсутствует внутренний резерв в архитектурно-планировочной структуре зданий для введения в них новых дополнительных или альтернативных функциональных зон для полнодневной школы.

В настоящее время в области ведется строительство новых школьных зданий, но их количество незначительно и не может обеспечить запрос государства и общества к обеспечению равных возможностей и условий для организации образовательной деятельности не зависимо от места проживания обучающихся. Однако и новые здания не в полной мере

¹ Постановление Правительства Белгородской области от 29 декабря 2015 г. № 498-пп. «Об утверждении государственной программы Белгородской области «Создание новых мест в общеобразовательных организациях Белгородской области». URL: <https://docs.cntd.ru/document/432841879> (дата обращения: 26.04.2025).

² Федеральный закон. Об образовании в Российской Федерации. от 29 декабря 2012 г. N273-ФЗ: [принят ГД ФС РФ 21.12.2012]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (дата обращения: 16.04.2025).

³ Постановление Правительства Белгородской области «Об утверждении государственной программы Белгородской области «Развитие образования Белгородской области» от 25 декабря 2023 г.№ 799-пп. URL: <https://golnk.ru/RAbV5> (дата обращения: 16.04.2025).

отвечают требованиям стандартов и запросу потребителей к спектру предлагаемых образовательных услуг в части внеурочной деятельности в полнодневной школе.

Наиболее рациональным для решения всех вышеобозначенных проблем видится путь организационно-педагогической реорганизации действующего фонда объектов образования с выполнением работ по архитектурной реновации его зданий.

Реновация, основанная на современных методах и приемах, с учетом концепции устойчивого развития, позволит экономически эффективно использовать существующую материально-техническую базу действующего фонда и вывести его на новый уровень, актуальный современным требованиям, а высвободившиеся ресурсы направить на строительство новых образовательных комплексов полного дня, проектирование которых необходимо вести на основе научно-обоснованных принципов функционально-планировочной и объемно-пространственной организации объектов общего образования нового поколения.

Теоретической базой данного исследования стали научные труды и практическая деятельность в области экспериментального проектирования В. И. Степанова [2], В. В. Смирнова [3]; работы Н. А. Моргуна, Н. М. Евтушенко-Мулуковой, М. В. Барабаш; Е. В. Пименовой [4], освещающие аспекты модернизации существующего школьного фонда, в том числе в сельской местности; исследования Т. К. Магулы и С. П. Славинского, затрагивающие вопросы планировочной организации и совершенствования номенклатуры помещений существующих школ и пришкольных участков для различных региональных условий; работы О. А. Буник, С. В. Позняк – о динамике развития и процессах преобразования школьных зданий под действием изменений образовательной системы; исследования А. В. Зудина, А. В. Миронюк, Б. М. Полуй, Э. З. Тургумбековой, определяющие особенности формирования архитектуры школьных зданий с учётом региональных и природно-климатических условий. Важное значение для данного исследования имеют работы Х. А. Бенаи, Т. В. Радионова, М. Ю. Откидач, связанные с направлениями развития зданий школ в условиях реконструкции [5–7], а также актуальные аспекты модульного строительства [8–10].

Различные вопросы формирования и оценки образовательной среды, архитектура зданий школ в зарубежных образовательных системах и вопросы глобальной трансформации систем образования изучены в трудах и публикациях таких авторов, как Fernandes A. Bergman K., McLaughlin J. Dovey K., Fisher K. Gómez-Galán J и др. [11–15].

Изучены научные труды российских ученых, внесших фундаментальный вклад в развитие отечественной педагогики: П. П. Блонский, К. Н. Вентцель, В. А. Сухомлинский; исследования и научно-практический опыт архитектора, педагога и общественника А. У. Зеленко в партнерстве с педагогом С. Т. Шацким по выявлению форм взаимодействия школы с социальной средой и развитию новой типологии зданий учебно-воспитательного назначения; работы современных ученых-педагогов С. И. Дорошенко, Ю. И. Дорошенко, посвященные актуальным моделям школьного образования и их перспективным направлениям (модель «школа полного дня»); работа В. М. Щербининой об УВК 1970-90 гг. представляет интерес для осмыслиния опыта и сохранения преемственности региональных подходов при проектировании образовательных комплексов.

Санитарно-гигиенические требования к архитектурно-планировочным решениям школьных зданий впервые появились в России на рубеже XIX-XX веков. Они оказывали определяющее влияние на формирование объемно-планировочных решений зданий и внутренних пространств, отражены в работах многих отечественных ученых [16]. Многие научные труды касаются вопросов особенностей эргономики пространств помещений школы и аспектам психологической безопасности и комфорта среды.

При разработке концепции реновации региональных школ были определены группы нормативных факторов системы технического регулирования в строительстве и

ведомственные нормы (санитарные и экологические) министерств и ведомств, участвующих в регулировании градостроительной деятельности в Российской Федерации¹ и оказывающих непосредственное влияние на формирование архитектуры образовательных комплексов.

Изученная теоретическая база стала основой для формирования структурных уровней теоретической модели образовательного комплекса полного дня [19] и разработки концепции стратегии реновации монофункциональных зданий школ в многофункциональные образовательные комплексы.

Цель исследования — состоит в разработке стратегии реновации зданий школ в полнодневные образовательные комплексы для реализации запроса жителей региона в получении образовательных услуг в наибольшей степени отвечающим современным российским стандартам общего образования, на основе действующего федерального и регионального законодательства, актуальных требований строительного и ведомственного нормирования, с учетом условий Белгородской области и концепции устойчивой архитектуры.

Задачи исследования: 1) изучить структуру действующего школьного фонда и выявить основные архитипы школьных зданий; 2) изучить методы и приемы реновации зданий школ и определить соответствующие выявленной региональной типологии школьных зданий; 3) предложить стратегию реновации зданий школ действующего фонда Белгородской области в образовательные комплексы полного дня, основанную на применении блок-модулей ЦВДиДО².

Объект исследования — здания общеобразовательных школ, нуждающиеся в реновации.

Предмет исследования — методы и приемы реновации зданий школ в образовательные комплексы полного дня.

2. Модели и методы

Исторический обзор зданий учебно-воспитательного назначения в границах территории современной Белгородской области (конец XIX – начало XXI вв.) позволил определить как под влиянием широкого ряда факторов, прежде всего – политических, связанных с изменениями в государственном устройстве и вытекающих из этого экономических, педагогических, архитектурно-художественных и ряда других факторов, проходило формирование типологии зданий действующего регионального школьного фонда.

На основании проведенного исследования удалось выявить наиболее часто встречающиеся типы зданий школ имперского периода, советского наследия этапов массового типового строительства и текущего федеративного периода.

Сегодня типология региональных школ представлена зданиями, построенными:

– **в имперский период** – они составляют до 2% от общего количества зданий фонда и, как правило, находятся в статусе объекта культурного наследия (ОКН) регионального значения. Сохранились здания уездных гимназий (г. Белгород в то время – уездный город), которые представляют собой небольшие, относительно губернских зданий, компактные или линейные 2-3-х этажные объемы, выполненные из красного кирпича; прошли несколько этапов капитальных ремонтов или реконструкций;

– **в советский период** – это здания, построенные по типовым советским проектам массового строительства различной вместимости с объемно-планировочной структурой линейного, компактного или блочного типа, составляют основную часть школьного фонда. В соответствии с классификацией 6-ти поколений советских типовых проектов [9], выявлено, что проекты I – II поколения составляют около 5%, проекты III, IV и V поколения – 40%, присутствует незначительное количество проектов VI поколения. Сельская школа

¹ Федеральный закон . О техническом регулировании. от 27 декабря 2002 № 184-ФЗ :[принят ГД ФС РФ 15.12.2002] : (с изменениями и дополнениями). – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102079587> (дата обращения: 06.03.2025). – Текст : электронный.

² ЦВДиДО — центр внеурочной деятельности и дополнительного образования образовательного комплекса полного дня . Термин впервые вводится авторами данной работы.

представлена зданиями III поколения типовых проектов, индивидуальными проектами учебно-воспитательных комплексов (УВК) развитого и позднего этапов, а также зданиями неустановленной типологии 2-й половины XX в., возведенные колхозами и совхозами на собственные средства, определить их принадлежность к какой-либо серии типовых проектов не удалось;

– в **федеративный период** процентное соотношение зданий распределяется следующим образом: проекты переходного этапа (1992–2010 гг.) – 12%; проекты основного этапа (2011–2022 гг.) – 3%; проекты текущего этапа (2022–2024 гг.) – менее 1%, находятся в стадии строительства. Для текущего федеративного периода характерным является новое строительство школьных комплексов или центров, включающих в себя здания общеобразовательной школы и детской дошкольной организации.

Основными типами школ, подлежащих реновации являются здания, построенные по типовым проектам советского периода.

Модульный подход при реновации зданий школ в комплексы. За время эксплуатации здания школ разных лет постройки, претерпели изменения, связанные с капитальным ремонтом, модернизацией или реконструкцией и в настоящее время объем их реновации при переходе в образовательные комплексы может существенно отличаться.

К известным методам реновации относится **экстенсивный метод**, который подразумевает снос существующего и возведение на его месте нового здания. Применение данного метода при реновации школ возможно, но скорее является исключением. Однако в настоящее время метод может быть актуален для пострадавших от разрушений зданий школ в приграничных районах региона, если они носят критический характер и восстановление здания в прежнем виде не является целесообразным (рис. 1).



Рисунок 1 – МБОУ «Муромская СОШ»: слева - введена в строй в 2000 г.; справа – после разрушения

Для реновации зданий школ, как правило, используется **интенсивный метод**, который заключается в улучшении, обновлении, повышении социальной привлекательности и экономической эффективности объекта образования, за счет создания, в том числе, условий для оказания дополнительного спектра образовательных услуг для различных возрастных категорий и социальных групп населения. Интенсивная реновация является особым видом реконструкции, которая заключается в обновлении, расширении функциональной программы существующего здания и формирования новой архитектурно-планировочной структуры комплекса (рис. 2).

При выполнении работ по реновации зданий действующего школьного фонда в современные объекты образования, необходим **комплексный подход**, учитывающий различные факторы влияния, к которым относятся: государственное регулирование; социально-педагогические, социальные, градостроительные; природно-климатические; экологические; архитектурные и объемно-планировочные факторы, включая методы реновации; архитектурно-художественные; конструктивные и инженерно-технические и дополнительные факторы (санитарно-гигиенические; эргономические; психологические;

пандемия/ чрезвычайная ситуация; цифровизация и сетевые формы обучения; резерв на развитие здания, в связи с меняющимися требованиями педагогики), факторы региональной идентичности.

Из всей группы факторов необходимо выделить актуальные задачи педагогики – педагогические основы влияют на архитектуру школ через нормативные требования, методики обучения, использование современных технологий и экологические принципы. Эти аспекты определяют формирование образовательного пространства, которое должно соответствовать потребностям учеников и учителей; требования экологической безопасности, связанные с качеством воздуха и воды, уровнем электромагнитного излучения и качеством освещения – эти проблемы влияют на здоровье учащихся и требуют решения; нормы санитарной гигиены и здоровье сбережение школьников¹ [11] – санитарно-гигиенические требования лежат в основе организации процесса обучения, отдыха, питания, работы в компьютерных классах.

Все вместе они в значительной степени определяют базовые подходы к функциональному, а также к типологическому уровням теоретической архитектурной модели образовательных комплексов нового поколения [19].



Рисунок 2 – Белгород. Школа №49: слева - до реконструкции; справа – после реконструкции

Реновация может быть основана на применении функциональных блок-модулей различной направленности, которые позволяют актуализировать здания разных лет строительства, в разной степени применяя возможности блок-модулей, в зависимости от существующего состояния архитектурно-планировочной структуры зданий.

Методы, приемы и принципы интенсивной архитектурной реконструкции школьных зданий подробно описаны в научных трудах ученых-архитекторов. К ним относятся:

- модернизация зданий без изменения его габаритов (капитальный ремонт с заменой изношенного инженерного оборудования);
- реконструкция типовых зданий путем пристройки гибкого функционального блок-модуля, позволяет разработать универсальное пространство, как для учебных секций, так и для общешкольных помещений;
- пристройка блок-модулей, непосредственно примыкающих друг к другу или соединенных через переход или галерею с основным зданием;
- реконструкция типовых зданий путем надстройки функционального блок-модуля, выполненного в легких конструкциях (1-2 этажа);
- метод гибкой перепланировки или модернизация, проводимый без изменения планировочных габаритов здания, с целью создания универсального, многофункционального пространства, трансформация которого может происходить объединением помещений от двух ячеек (кабинетов) до блока;
- метод достройки (встройки) функционально-планировочными элементами; новое строительство отдельно стоящего корпуса или блок-модуля.

¹ СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования»

К новым методам относится *метод «упаковки»*, который позволяет объединить новые блок-модули и старые части здания в единый стилистически выдержаный объем¹.

Актуальным является *комплексный метод*, допускающий возможность применения нескольких методов одновременно, он позволяет совмещать реконструкцию существующего здания и строительство нового здания функционального блок-модуля (рис. 3).

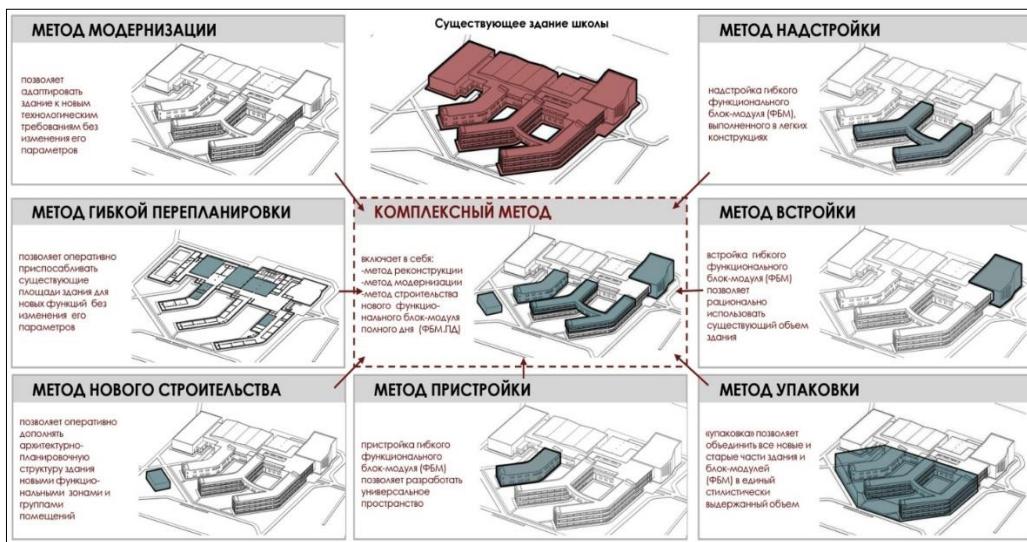


Рисунок 3 – Методы и приемы реновации зданий в образовательные комплексы, по И. П. Чечель

Согласно исследованию Каганович Н. Н.: «...современные модели школьных зданий могут быть представлены двумя стратегиями, в том числе в архитектурно-строительном проектировании: *модульный подход*, при котором отдельные модули формируют объемно-планировочное решение и структуру здания в целом с возможностью дальнейшего пространственного развития или переустройства, что несомненно расширяет возможности строительства сети школьных зданий. Второй подход рассматривает школьное здание как в высшей степени *контекстуальный* и уникальный объект, воплощение авторской концепции» [17]. Поскольку адаптация школьных зданий к современным требованиям и переходу их в образовательные комплексы полного дня, согласно региональным задачам, должна охватить наибольшее количество зданий школ за короткий промежуток времени, *в качестве стратегии реновации, принят модульный подход* [4-10].

Наилучшей формой для адаптации существующей функционально-планировочной и объемно-пространственной структуры образовательного комплекса является применение функциональных блок-модулей. В качестве блок-модулей в данной работе выступают *здания Центров внеурочной деятельности и дополнительного образования* – новые, дополнительные многофункциональные блоки в функционально-планировочной и объемно-пространственной структуре вновь формируемых полнодневных образовательных комплексов.

Проведенный анализ зданий действующего школьного фонда Белгородской области позволяет сделать предположение о том, что для реализации запросов потребителей образовательных услуг, необходимо проектирование и строительство дополнительных площадей в составе образовательного комплекса полного дня. Наиболее правильным представляется сложившуюся архитектурно-планировочную структуру, состоящую из двух функциональных блоков (учебного и общешкольного) дополнить новым

¹ Термин заимствован из магистерской диссертации «Принципы адаптации типовых школьных пространств в условиях реновации на примере г. Севастополя», автор Анкудинова Маргарита (кафедра дизайн архитектурной среды МАРХИ), рук. Панова Н.Г.

многофункциональным блоком для организации внеурочной деятельности школьников и взрослых жителей территории, определив его как **центр внеурочной деятельности и дополнительного образования** (ЦВДиДО). Функциональные процессы, проходящие в ЦВДиДО должны быть связаны с подготовкой домашних заданий, организацией досуга и отдыха школьников при их нахождении в здании школы в течении полного дня с 8-00 до 18-00 часов, получением услуг дополнительного образования по творческим направлениям, не покидая территории комплекса; занятия совместным творческим трудом и осуществление многих других функций, направленных на всестороннее развитие и содержательное общение[18-21].

Новый многофункциональный блок должен разрабатываться в соответствии с действующими нормативными документами по проектированию общеобразовательных школ, а также на основании рекомендаций СП 460. 1325800.2010 по составу помещений для образовательных организаций дополнительного образования.

Исходя из видов внеурочной деятельности, которые должны быть представлены в современном образовательном комплексе, авторами были предложены основные функционально-планировочные блоки, которые, по их мнению, необходимо включить в состав многофункционального блока ЦВДиДО полнодневного образовательного комплекса (табл. 1).

Таблица 1 – Функционально-планировочные блоки

Наименование	Состав помещений
Блок пассивного отдыха	Помещения и зоны для отдыха , многофункциональные рекреации, зона тихого отдыха на прилегающей территории
Блок общения	Помещения и зоны для межличностной и групповой коммуникации индивидов . К ним относятся школьный коворкинг, многофункциональная рекреация, кафе или иные формы предприятий общественного питания и отдыха, прогулочная зона на прилегающей территории
Блок общественной деятельности	Помещения для проведения общественно-полезной и организационной деятельности . К ним относятся кабинеты общественных организаций, лекционный зал, зона волонтеров и поисковых отрядов, кабинеты школьного управления
Блок познавательной деятельности	Помещения для организации программ дополнительного образования и творчества . К ним относятся лекционный зал, классы для обучения, творческие студии, библиотека, медиатека, читальный зал, зона букинга на прилегающей территории
Блок физической активности	Зоны повседневной двигательной активности, а также помещения для групповых и индивидуальных занятий спортом . К ним относятся универсальный спортивный зал, тренажерный зал, танцевальный зал, на прилегающей территории спортивная зона может включать универсальную площадку, ГТО и воркаут-площадку, скейтпарк, площадку для игровых видов спорта и др.
Блок массовой и развлекательной деятельности	Помещения и зоны для игровой деятельности и проведения событийных мероприятий . К ним относятся зрительный зал, кинозал, игровые комнаты, универсальная рекреация, а также на прилегающей территории зоны игровой площадки, амфитеатра, эстрады и др.
Блок для самоподготовки	Помещения для подготовки домашних заданий , самоподготовки школьников старших классов, зоны тихого отдыха и универсальные рекреации
Блок дополнительного образования взрослых в области компьютерной грамоты	Зоны для освоения основных возможностей компьютера для повседневной познавательной и творческой деятельности, учебные кабинеты, преподавательские и др.
Блок совместного творчества детей и взрослых	Помещения для проведения мастер-классов , индивидуальные творческие мастерские, универсальные залы
Блок предпрофессиональной подготовки и освоения бизнес-процессов	Зоны для занятий на тренажерах- симуляторах , интерактивные тренажёры для освоения различных специальностей, кабинеты для теоретических и практических занятий

3. Результаты исследования и их анализ

Для реализации государственных программ Белгородской области по переходу на полнодневный формат работы образовательных организаций и выполнения требований ФГОС к организации внеурочной деятельности, необходимо выработать единую стратегию, на основе которой будет проходить реновация зданий школьного фонда. В работе предложена стратегия реновации региональных школ в образовательные комплексы, которая состоит из двух этапов (рис. 4).

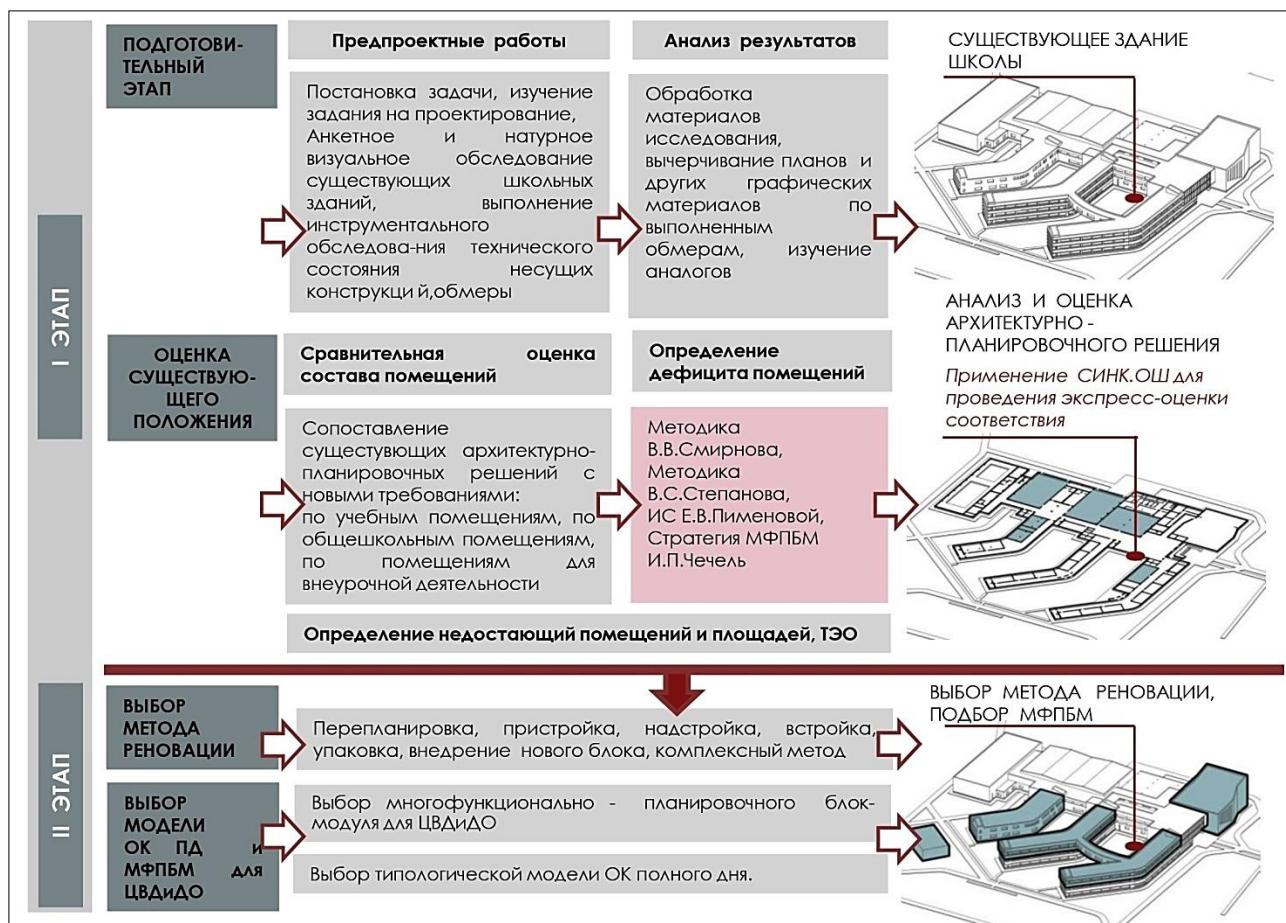


Рисунок 4 – Схема стратегии реновации зданий школ в полнодневные образовательные комплексы, разработано авторами

Первый этап реновации заключается в приведении существующей архитектурно-планировочной структуры здания общеобразовательной школы в соответствие с современными требованиями к организации учебно-воспитательного процесса и актуальным нормам строительного и ведомственного нормирования. Он основан на разработанных ранее методиках Степанова В. И., Смирнова В. В., Пименовой Е. В. по выявлению проектных решений, не соответствующих современным требованиям и нарушающим актуальные законодательные и нормативные акты [2-4]. На этом этапе необходимо выполнение обмерных работ, разработка чертежей по фактическим промерам, проведение опросов персонала организаций для выявления их предпочтений по дополнительным функциям, выполнение сравнительного анализа соответствия существующих планировок требуемым нормам по организации классно-урочной и внеурочной деятельности.

Результатом по первому этапу будет являться определение недостающих помещений, площадей и объема работ для адаптации собственно существующего здания школы

(модернизация, капитальный ремонт, реконструкция и др.), на базе которой формируется новый полнодневный образовательный комплекс.

Второй этап реновации заключается в расширении архитектурно-планировочной структуры существующего здания школы для организации внеурочной деятельности, досуга, отдыха и дополнительного образования школьников в комплексе полного дня, за счет ввода дополнительного функционального блок-модуля ЦВДиДО.

Результатом второго этапа является выбор необходимых блок-модулей ЦВДиДО и определение возможных методов реновации (пристройка, надстройка, «упаковка», новое строительство, комплексный метод). Далее следует поиск объемно-пространственного решения, основанный на общих композиционных и стилистических приемах для объединения существующих и новых зданий в единый архитектурный комплекс.

Функциональное наполнение дополнительного блок-модуля ЦВДиДО предлагается осуществить на основе функциональных зон для создания условий реализации режима полного дня и занятий по пяти направлениям развития личности и дополнительного образования обучающихся, а также взрослых, проживающих на территории, попадающей в зону обслуживания комплекса. Для этого авторами разработаны **базовые, специализированные, полифункциональные и комплексные блок-модули ЦВДиДО**, предназначенные для реализации различных сценариев внеурочной деятельности в полнодневном образовательном комплексе (рис.5).

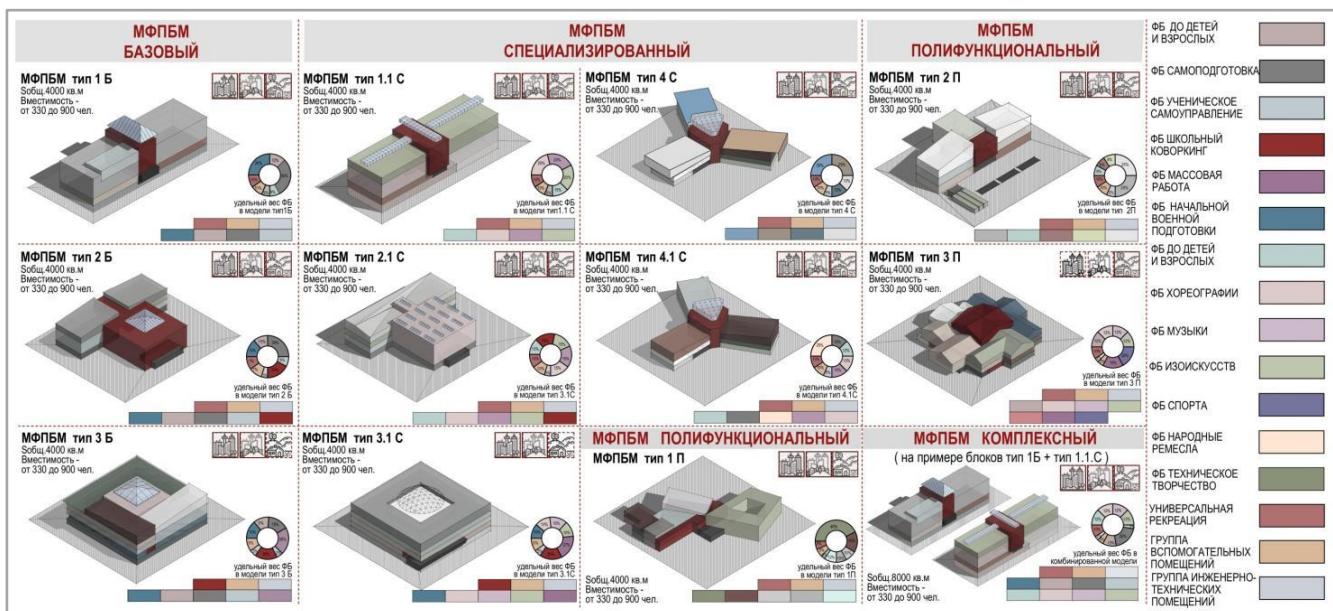


Рисунок 5 – Архитектурно-типоведческие модели многофункциональных блок-модулей ЦВДиДО, разработано авторами

Данная архитектурная типология блок-модулей ЦВДиДО предлагается исходя из выявленных основных типов зданий региональных школ. Например, при реновации зданий с Н, П, Г и Т-образной формой плана целесообразно применять блок-модули типов 1Б и 1.1С или 2Б и 2.1С; для блочных зданий – тип 1Б и 1.1С; 3Б и 3.1С; для Т-образного или компактного плана – тип 2Б и 2.1С (рис. 6). Для сельских и пригородных территорий, где застройка не отличается высокой плотностью, рекомендовано применение крупных специализированных блок-модулей, например 4С; 4.1С; 1П; 2П; 3П.

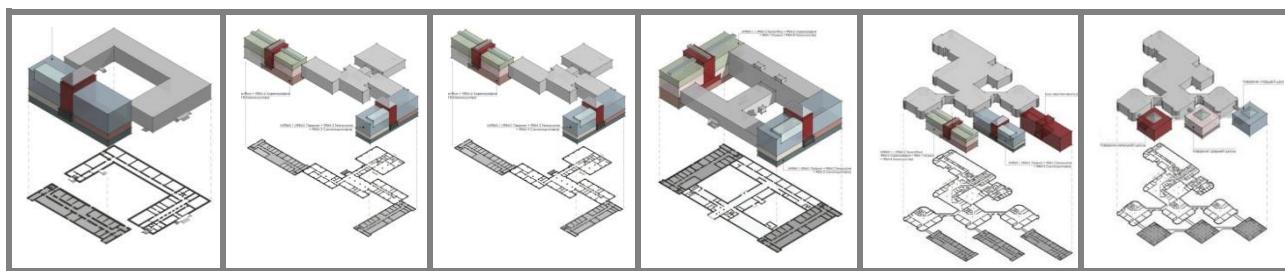


Рисунок 6 – Применение блок-модулей ЦВДиДО для реновации зданий школ, реализованных строительством по типовым проектам 1958, 1962, 1980 гг. и индивидуальным проектам повторного применения 2010-20 гг., разработано авторами

Стратегия модульного подхода с применением блок-модулей ЦВДиДО позволяет решить ряд вопросов при реновации существующих зданий школ и формировании архитектуры образовательных комплексов полного дня:

- выполнить мероприятия по модернизации существующих зданий для адаптации их архитектурно-планировочной структуры к современным требованиям ФГОС и документам строительного и ведомственного нормирования, за счет перепланировки помещений, высвободившихся после выноса функциональных зон внеурочной деятельности в новые функциональные блок- модули;
- создать дополнительные помещения для занятий после уроков по развивающим направлениям для членов образовательных групп различных возрастных групп;
- сформировать на базе нового комплекса социокультурный, общественно-образовательный центр в структуре жилой территории (городского или пригородного микрорайона, села) открытый «для всех», в соответствии с социальным запросом жителей к содержанию и условиям предоставления услуг широкого спектра (образовательных, досуговых, освоения новых профессий и технологий и т.д.), как точку притяжения общественной активности, общения и семейного отдыха;
- оперативно донаращивать функциональные зоны, на основе применения новых функциональных блок-модулей ЦВДиДО. Применение блок-модулей позволит оперативно адаптировать здания комплексов к новым возникающим запросам за счет присоединения новых элементов к уже существующим, через последовательное увеличение количества применяемых блок-модулей, дает возможность дальнейшего пространственного развития или переустройства комплекса (Рис.7);

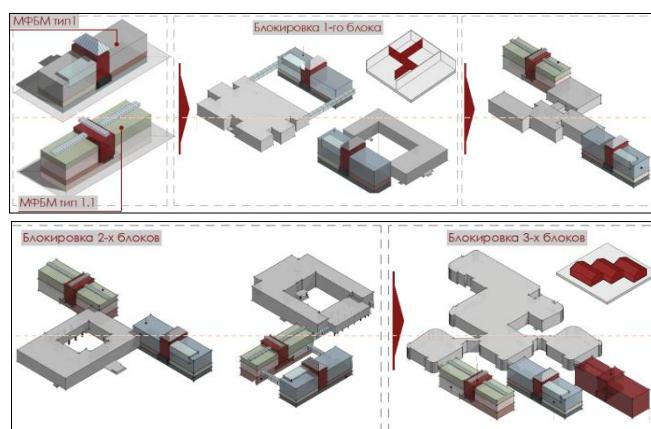


Рисунок 7 – Примеры наращивания многофункциональных блок-модулей ЦВДиДО полнодневных образовательных комплексов с блокировкой с существующими зданиями школ, разработано авторами

- преимущество модульного подхода с применением блок-модулей ЦВДиДО заключается в том, что он позволяет создавать разнообразные варианты проектных решений,

усиливая архитектурно-типологическое многообразие образовательных комплексов полного дня, помогает лучше структурировать территорию и формировать новые пространства – точки притяжения вокруг зданий ЦВДиДО (рис. 8);

– предотвращает быстрое моральное старение школьных зданий и формирует школьную архитектуру опережающего характера с учетом устойчивого развития, отражающую актуальные изменения в содержании образовательных программ, возможности внедрения в образовательный процесс инновационных технологий и систем обучения;

—обеспечит автономность работы функциональных зон различной направленности (для детей, школьников и для жителей территории) (рис. 8).

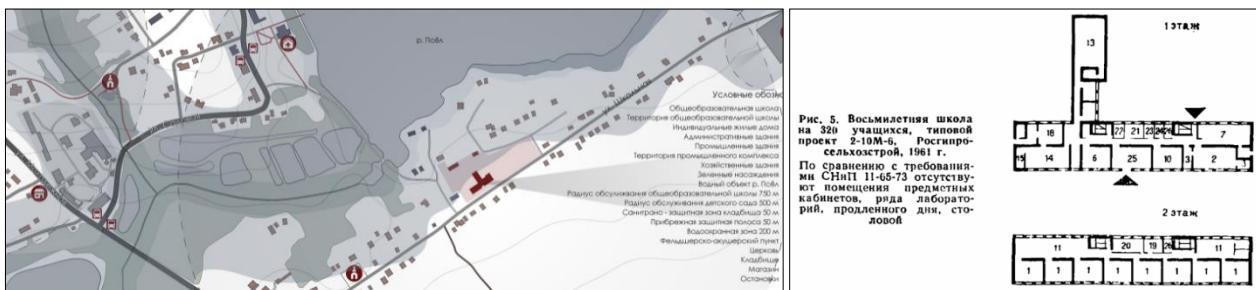


Рисунок 8 – Экспериментальный проект реновации общеобразовательной школы в с.Береговое Белгородской области, арх.Чечель И.П., 2024 г. Ситуационная схема участка проектирования;

- план 1 и 2 этажей (т.н. № 2-10М-6)

На рис. 8-11 показан пример реновации общеобразовательной школы в с. Береговое Белгородской области (автор арх. Чечель И. П.). Школа была построена в середине 1960-х годов по типовому проекту №2–10М–6 «Сельская восьмилетняя школа на 320 учащихся». Для развития здания школы в образовательный комплекс с Центром внеурочной деятельности и дополнительного образования, в проекте реновации были применены несколько типов многофункциональных планировочных блок-модулей (рис. 5) с эксплуатируемыми зелеными крышами – блок-модули 1Б и 1.1С для дополнения функциональной структуры существующего здания школы и блок-модуль 3П для создания общественно-образовательного центра, входящего в структуру образовательного комплекса.

Современные градостроительные нормативы допускают уменьшение расчетной площади земельного участка школы до 20% в условиях реновации¹, однако использование крыши для организации локаций для отдыха и общения школьников, позволяет существенно снизить или полностью компенсировать потерю площади участка, использованной под размещение новых дополнительных блок-модулей. Организация зеленых «живых» крыш является эффективным приемом создания устойчивых зданий, цветовое решение фасадов зданий, выполненное в светлых тонах защищает от перегрева внутренние помещения в летнее время, (ЦВДиДО работает и во время каникул), применение эффективных утеплителей для наружных конструкций здания (стены, кровля), большие оконные проемы, помогают сберегать ресурсы и обеспечивают снижение затрат на функционирование образовательного комплекса. Образовательный комплекс запроектирован так, чтобы своим объемно-пространственным решением и применяемыми отделочными материалами он гармонично вписался в местный ландшафт, учитывая при этом направление движения солнца в течение дня и климатические характеристики региона. «За счет чередования разномасштабных метрических рядов создается многообразие архитектурной формы, архитектура становится изменчивой, текучей, олицетворяющей философию живой природы» [22].

¹ СП 42.13330.2011 «СНиП 2.07.01-89* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», прил. Д, табл. Д.1.

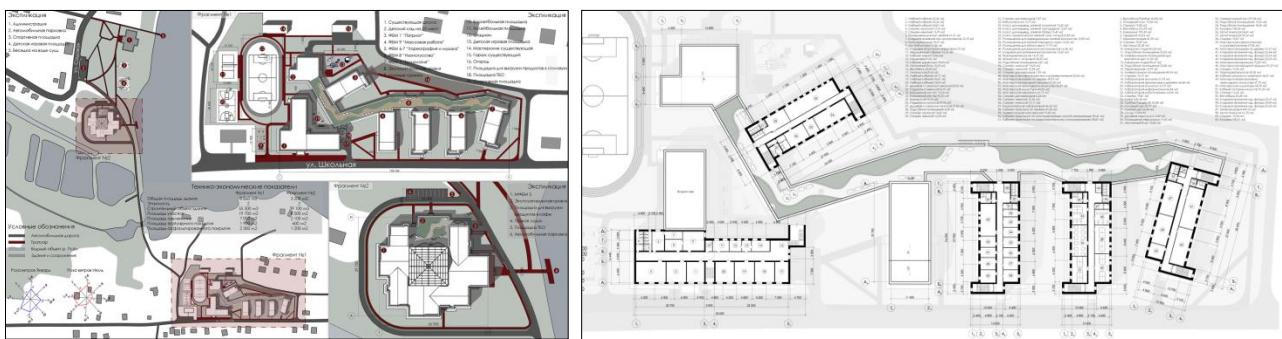


Рисунок 9 – С. Береговое. Генеральный план образовательного комплекса полного дня; план 2 этажа с «зеленой» крышей – зона отдыха над многофункциональной рекреацией



Рисунок 10 – С. Береговое. Общий вид образовательного комплекса (школа, ДС и блок-модули 1Б, 1.1С, многофункциональная рекреация с «зеленой» крышей); фрагмент зоны отдыха на «зеленой» крыше



Рисунок 11 – Экспериментальный проект реновации общеобразовательной школы в с. Береговое Белгородской области, арх. Чечель И.П., 2024 г. Полифункциональный блок-модуль тип 3П общественно-образовательного центра села, общий вид с эксплуатируемой «зеленой» крышей.

4. Заключение

1. Согласно проведенным исследованиям, основную часть школьного фонда Белгородской области составляют здания, построенные по типовым советским проектам 2-й половины XX века (1960–1980-е гг.). Исследованные здания устарели физически и морально, но, в целом сохраняя свою работоспособность, нуждаются в комплексном решении вопросов по восстановлению, реконструкции и модернизации для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций и инженерных систем и создания комфортных условий для обучающихся. Моральное старение зданий опережает их физический износ и приводит к возникновению противоречия между запросом государства и общества к условиям реализации законодательных документов по модернизации образовательной системы и возможностями материально-технической базы зданий, которыми располагают образовательные организации, оказывающие услуги по воспитанию и образованию детей и школьников. Такая ситуация является характерной для большинства зданий, составляющих региональный фонд.

2. В работе предложена стратегия реновации зданий общеобразовательных школ действующего фонда Белгородской области в образовательные комплексы полного дня на основе модульного подхода с применением многофункциональных блок-модулей ЦВДиДО, с учетом концепции «зеленой» архитектуры. Стратегия заключается в проведении комплекса работ по укрупнению монофункционального объекта «школа» в многофункциональный объект «образовательный комплекс полного дня». Для этого архитектурно-планировочная структура существующего здания школы дополняется новым функциональным блок-модулем ЦВДиДО. В основе формирования блок-модулей лежит принцип «дробления» объектов дополнительного образования, который подразумевает изменение их градостроительного масштаба с городского (районного) значения до масштаба структурного подразделения образовательного комплекса и их интеграция непосредственно в организационную и архитектурно-планировочную структуру комплексов для создания комфортных условий для обучающихся.

3. Предложена архитектурная типология многофункциональных блок-модулей ЦВДиДО, основанная на выявленной типологии зданий действующего регионального школьного фонда. Разработанные блок-модули ЦВДиДО учитывают ряд факторов, в том числе – основные положения «зеленого» строительства, которые влияют на формирование нового архитектурного объекта — образовательного комплекса полного дня в условиях реновации существующих зданий школ. В основе объемно-планировочной структуры блок-модулей лежат основные габариты зданий школ линейной, компактной и разветвленной объемно-пространственной композиции, на основе Н, П, Г, Т – образной, периметральной и блочной схемы плана. Предложения по типологии блок-модулей разработаны с учетом распространенных конструктивных схем — это здания с несущими стенами, выполненные из силикатного кирпича (т.п. 2С–02–07; 2С–02–08) и каркасные здания из крупно-сборных элементов с навесными стеновыми панелями (т.п. 224–1–194/78; 222 –1–193/75; 222–1–289; 222–1–231; 224–1–88; 222–1–197/75; 222–1–278). Блок-модули ЦВДиДО дают возможность создавать новую архитектуру для существующих объектов, через комбинаторику различных вариантов применения их архитектурно-типологических моделей.

4. Применение блок-модулей ЦВДиДО при реновации зданий школ в образовательные комплексы полного дня дает значительную экономию средств регионального бюджета, в сравнении со строительством объектов общего образования «с нуля», что позволяет рационально и эффективно использовать существующую материально-техническую базу и в максимально короткие сроки провести реновацию зданий школьного фонда. Основные элементы «зеленой» архитектуры, заложенные в разработанных блок-модулях, обеспечат выполнение требований экологических стандартов, предъявляемым к современным образовательным комплексам нового поколения.

Значимость результатов данной работы заключается в том, что предложенная стратегия реновации на основе применения блок-модулей ЦВДиДО, входящих в функционально-планировочную и объемно-пространственную структуру новых образовательных комплексов

полного дня, предоставляет архитектору широкие возможности по созданию индивидуальных объектов современной архитектуры на основе применения вариативного ряда типологических моделей блок-модулей ЦВДиДО, которые способны полностью изменить архитектуру существующих школьных зданий, развив ее в многофункциональные образовательные комплексы полного дня, отвечающие актуальным стандартам, предъявляемым к современным объектам общего образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Региональный проект «Организация образовательной деятельности в общеобразовательных учреждениях Белгородской области в режиме «Школа полного дня» URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obsheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (дата обращения: 26.04.2025).
2. Степанов В. И. Школьные здания. М., Стройиздат. 1975. 239 с.
3. Смирнов, В. В. Архитектурное проектирование зданий общеобразовательных школ: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности 270301 – архитектура Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. архитектурно–строительный ун-т, 2006 . 59 с.
4. Пименова Е. В. Методические основы архитектурно–планировочной реконструкции школьного фонда: Исследования и рекомендации на примере города Ростова–на–Дону: автореферат дис....кандидата архитектуры: 18:00:02. Санкт–Петербург, 2003. 24 с.
5. Бенаи Х. А., Радионов Т. В. Совершенствование архитектурно градостроительной типологии зданий и сооружений, подлежащих реконструкции // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 2(136). С. 9-14. EDN HCIDKF.
6. Бенаи Х. А., Радионов Т. В. Современные научные и практические подходы в области архитектурно-градостроительной реконструкции жилых и общественных зданий и сооружений // Строитель Донбасса. 2019. № 1(6). С. 27-31. EDN NQFWBH.
7. Радионов Т. В., Откидач М. Ю. Современные направления развития архитектуры зданий и сооружений общеобразовательных школ, подлежащих реконструкции // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2021. № 2(148). С. 78-83.
8. Воличенко О. В., Огородников С. Н., Халиль И. Мобильная система для труднодоступных регионов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. №2(46). С.76–86. DOI 10.22227/2311-1518.2024.2.76-86.
9. Ахмедов А. З. Модернизация школьных зданий на основе блока пристроек // AMIT. 2017. №2 (39).
10. Чечель И. П., Галдин Р. Е., Нетикова А. Д. Блок-пристройка как инструмент создания центров дополнительного образования и индивидуализации учебных заведений // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова [Электронный ресурс]: Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, май 2024. Ч. 1. С. 42-47.
11. Fernandes A., Bacharel M., Lourenço P., Alegre A. Renovation of Modern Secondary School Buildings: Two Case Studies in Portugal // Metamorphosis. The Continuity of Change: Proc. of the 15th International DOCOMOMO Conference. Ljubljana, 2018. P. 352–358.
12. Bergman K. A School of Architecture Addition & Renovation: A Design Pertaining to Our Process of Education: Master's thesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1994. 113 p.
13. McLaughlin, J. Birr Community School – A Case Study in Retrofitting and Conserving Modern Architecture // Engineering Education for Sustainable Development Conference, 14-16 June. Cork, Ireland. – Cork: University College Cork, 2021.
14. Dovey K., Fisher K. Designing for adaptation: The school as socio-spatial assemblage // The Journal of Architecture. 2014. Vol. 19, № 1. DOI: 10.1080/13602365.2014.882376.
15. Manual for Planning and Construction of School Buildings. – Concord, NH: New Hampshire Department of Education, 2024. – 72 p.
16. Кучма В. Р., Степанова М. И. Гигиенические требования к современным архитектурно-планировочным решениям школьных зданий. Гигиена и санитария. 2021; 100 (9): 998–1003. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-998-1003>
17. Каганович Н. Н., Гриднева Е. С.Архитектурное проектирование общеобразовательной школы : учебное пособие / Н. Н. Каганович, Е. С. Гриднева ; — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020.— 118 с.
18. Воличенко О. В., Вялых Р. Д. Методы экологического проектирования школ и детских садов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 2. С. 81-97. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-42-2-23-36

19. Воличенко О. В., Чечель И. П. Теоретическая модель образовательного комплекса полного дня / О. В. Воличенко, И. П. Чечель // Строительство и реконструкция.– 2025.– №5 (121) – С.87-108.– DOI: 10.33979/2073-7416-2025-121-5-87-108.

20. Чечель И.П. Архитектурно-планировочная структура сельского учебно-воспитательного комплекса – как основа современного образовательного комплекса полного дня // Международная молодежная научная конференция. Курск: ЗАО «Университетская книга», сентябрь 2024. Т. 3. С. 95 – 101.

21. Задвернюк Л. В. Проблемы реализации современной модели организации школьного пространства в архитектуре России // Ноэма (Архитектура. Урбанистика. Искусство). 2020. № 2(5). С. 125-139. EDN VYOOJW.

22. Воличенко, О. В. Влияние мейнстримов западного авангарда в архитектуре Центральной Азии // Архитектон: известия вузов. 2013. № 1(41). С. 3. EDN PXSQHF.

REFERENCES

1. Regional project "Organization of educational activities in educational institutions of the Belgorod region in the "Full-time school" [«Organizaciya obrazovatel'noj deyatel'nosti v obshheobrazovatel'nyx uchrezhdeniyax Belgorodskoj oblasti v rezhime«Shkola polnogo dnya»] mode - URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obsheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (date of access: 26/04/2025). — Text : electronic. (rus)
2. Stepanov V.I. School buildings [Shkol`nye zdanija]. Moscow, Stroyizdat. 1975. 239 (rus)
3. Smirnov V. V. Architectural design of buildings of secondary schools [Arxitekturnoe proektirovanie zdanij obshheobrazovatel`nyx shkol] : a textbook for course and diploma design for students of specialty 270301 – architecture / V. V. Smirnov. – St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2006. – 59 p. – Text : direct. (rus)
4. Pimenova, E. V. Methodological foundations of architectural and planning reconstruction of the school fund: Research and recommendations on the example of the city of Rostov-on-Don [Metodicheskie osnovy arxitekturno-planirovochnoj rekonstrukcii shkol`nogo fonda: Issledovaniya i rekomendacii na primere goroda Rostova-na-Donu] : abstract of the dissertation....Candidate of Architecture: 18:00:02 / Elena Valeryevna Pimenova; [Place of defense: St. Petersburg State University of Architecture. "He's building. university]. – St. Petersburg, 2003. – 24 p. –Text : direct. (rus)
5. Benai H. A., Radionov T.V. Improving the architectural and urban typology of buildings and structures to be reconstructed [Sovershenstvovanie arxitekturno gradostroitel`noj tipologii zdanij i sooruzhenij, podlezhashhhix rekonstrukcii] // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2019. No. 2(136). pp. 9-14. EDN HCIDKF. (rus)
6. Benai H. A., Radionov T.V. Modern scientific and practical approaches in the field of architectural and urban reconstruction of residential and public buildings and structures [Sovremenny'e nauchny'e i prakticheskie podxody v oblasti arxitekturno-gradostroitel`noj rekonstrukcii zhilyx i obshhestvennyx zdanij i sooruzhenij] // The builder of Donbass. 2019. No. 1(6). pp. 27-31. EDN NQFWBH. (rus)
7. Radionov T. V., Otkidach M.Yu. Modern trends in the development of architecture of buildings and structures of secondary schools subject to reconstruction [Sovremenny'e napravleniya razvitiya arxitektury zdanij i sooruzhenij obshheobrazovatel`nyx shkol, podlezhashhix rekonstrukcii] // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2021. No. 2(148). pp. 78-83. (rus)
8. Volichenko O.V., Ogorodnikov S.N., Khalil I. Mobile system for remote regions [Mobil`naya sistema dlya trudnodostupnyx regionov] / Biospheric compatibility: man, region, technology. 2024. No. 2(46). pp.76-86 (rus)
9. Akhmedov A.Z. Modernization of school buildings based on block extensions [Modernizaciya shkol`nyx zdanij na osnove blok pristroek] // AMIT. 2017. №2 (39). (rus)
10. Chechel I.P., Galdin R.E., Netikova I.P. Block-extension as a tool for creating centers of additional education and individualization of educational institutions [Blok-pristrojka kak instrument sozdaniya centrov dopolnitel`nogo obrazovaniya i individualizacii uchebnyx zavedenij]. // International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov [Electronic resource]: Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, May 2024. - Part 1. -pp. 42-47. (rus)
11. Fernandes A., Bacharel M., Lourenço P., Alegre A. Renovation of Modern Secondary School Buildings: Two Case Studies in Portugal // Metamorphosis. The Continuity of Change: Proc. of the 15th International DOCOMOMO Conference. Ljubljana, 2018. P. 352–358.
12. Bergman K. A School of Architecture Addition & Renovation: A Design Pertaining to Our Process of Education: Master's thesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1994. 113 p.
13. McLaughlin, J. Birr Community School – A Case Study in Retrofitting and Conserving Modern Architecture // Engineering Education for Sustainable Development Conference, 14-16 June. Cork, Ireland. – Cork: University College Cork, 2021.
14. Dovey K., Fisher K. Designing for adaptation: The school as socio-spatial assemblage // The Journal of Architecture. 2014. Vol. 19, № 1. DOI: 10.1080/13602365.2014.882376.

15. Manual for Planning and Construction of School Buildings. – Concord, NH: New Hampshire Department of Education, 2024. – 72 p.
16. Kuchma V.R., Stepanova M.I. Hygienic requirements for modern architectural and planning solutions for school buildings. Hygiene and Sanitation. [Gigienicheskie trebovaniya k sovremennoy arхitekturno-planirovochnyy resheniyam shkol'nyx zdaniy. Gigiena i sanitariya]. 2021; 100 (9): 998–1003. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-998-1003> (rus)
17. N.N.Kaganovich N.N., E.I.Gridneva E.I. Architectural design of secondary schools : textbook. manual / N.N. Kaganovich, E. N.I. Gridneva ; Yekaterinburg : Ural Publishing House. University, 2020.118 p.
18. O. V. Volichenko, R. D. Vyalykh. Methods of ecological design of schools and kindergartens // Biospheric compatibility: man, region, technology. 2023. No. 2. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-42-2-23-36
19. Volichenko, O.V.; Chechel, I.P.; Theoretical Model of a Full-Day Educational Complex [Teoreticheskaya model' obrazovatel'nogo kompleksa polnogo dnya] / I.P. Chechel, O.V. Volichenko // Construction and Reconstruction. — 2025. — No. 5 (121). — Pp. 87–108. — DOI: 10.33979/2073-7416-2025-121-5-87-108.(rus)
20. Chechel I.P. Architectural and planning structure of rural educational complex – as the basis of a modern full-time educational complex [Arхitekturno-planirovochnaya struktura sel'skogo uchebno-vospitatel'nogo kompleksa – kak osnova sovremennoy obrazovatel'nogo kompleksa polnogo dnya] / I.P.Chechel. //International Youth Scientific Conference [Electronic resource]: Kursk: ZAO Universitetskaya Kniga, September 2024, vol. 3, pp. 95-101 (rus)
21. Zadvernyuk, L. V. Problems of implementing the modern model of school space organization in Russian architecture [Problemy` realizacii sovremennoj modeli organizacii shkol'nogo prostranstva v arхitekturakh Rossii] // Noema (Architecture. Urbanistics. Art). 2020. No. 2(5). pp. 125-139. EDN VYOOJW. (rus)
22. O. V. Volichenko The influence of the Western avant-garde mainstream in Central Asian architecture // Architecton: izvestiya vuzov. 2013. No. 1(41). p. 3. EDN PXSQHF.

Информация об авторах:

Воличенко Ольга Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
ФГАОУ ВО «Российский университет Дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия;
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры, реставрации и дизайна
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Чечель Иван Павлович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура и градостроительство»
E-mail: golden-line7@yandex.ru

Information about authors:

Volichenko Olga V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU); Moscow, Russia;
FGAOU HE "Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University); Moscow, Russia;
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia,
Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture, Restoration and Design
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Chechel, Ivan P.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia, Senior Lecturer at the Department of Architecture and Urban Planning
E-mail: golden-line7@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03.08.2025

The article was submitted 03.08.2025

Одобрена после рецензирования 21.10.2025

Approved after reviewing 21.10.2025

Принята к публикации 01.11.2025

Accepted for publication 01.11.2025

А.С. ГУРЬЕВ¹, А.Е. ЕНИН¹, С.Н. ГУРЬЕВ¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦВЕТОВОЙ СРЕДЫ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ ГОРОДА

Аннотация. Статья посвящена выявлению основополагающих принципов и приёмов, способствующих управлению городской колористикой и развитием цветового проектирования общественных пространств, с учётом социально-культурной обусловленности, структурно-морфологической основы архитектурно-градостроительной формы, цветовой динамики природного контекста и других факторов, влияющих на создание уникального своеобразия города и его цветового образа. Определены основные принципы и приёмы, способные оказывать существенное влияние на формирование цветовой среды общественных пространств города и уникальность колористического образа города при проектировании его предметно-пространственной и архитектурной среды. Авторами делается вывод о том, что применение представленных принципов формирования цветовой среды общественных пространств города будет способствовать совершенствованию и оптимизации процесса проектирования колористики предметно-пространственной и архитектурной среды города.

Ключевые слова: колористика, общественное пространство, принципы проектирования, цвет.

A.S. GURYEV¹, A.E. YENIN¹, S.N. GURYEV¹

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

PRINCIPLES OF DESIGNING THE COLOR ENVIRONMENT OF PUBLIC SPACES IN THE CITY

Abstract. This article is devoted to identifying the fundamental principles and techniques for managing urban coloristics and developing the color design of public spaces. This is considered in the context of socio-cultural factors, the structural-morphological basis of architectural and urban form, the color dynamics of the natural setting, and other elements that contribute to a city's unique character and its visual color identity. The authors define the key principles and techniques capable of significantly influencing the formation of the color environment in a city's public spaces and the uniqueness of its color image in the design of its object-spatial and architectural environment. It is concluded that applying these principles for shaping the color environment of urban public spaces will enhance and optimize the process of designing the coloristics of the city's object-spatial and architectural setting.

Keywords: coloristics, public space, design principles, color.

1. Введение

Факторы, влияющие на формирование колористики общественных пространств.

Толковый словарь русского языка С.И. Ожегова поясняет: - «Принцип – основное, исходное положение теории, учения, мировоззрения...» [1], при этом, следует учесть специфику исследуемой теории и факторы, влияющие на определение основополагающих принципов в той сфере деятельности, в которой ведётся исследование.

Для формирования цветовой среды общественных пространств города наиболее весомыми факторами являются: природно-климатические [2], [3], [4], социально-экономические [5], цветовая культура региона [6], [7] и морфология объёмно-пространственной и градостроительной структуры [8]. В соответствии с этой группой факторов делается попытка определить наиболее существенные принципы проектирования колористики, в том числе принципы цветового взаимодействия внешних и внутренних пространств города.

Объект исследования: принципы проектирования колористики городских общественных пространств.

Предмет исследования: особенности проектирования цветовой среды общественных пространств города на базе основополагающих принципов формирования градостроительной колористики.

Цель работы заключается в определении принципов проектирования цветовой среды общественных пространств и выявление их взаимосвязей.

Задачи исследования:

- определить группу факторов, влияющих на процесс проектирования цветовой среды общественных пространств города;

- выявить основные принципы и приёмы проектирования цветовой среды общественных пространств города.

Методика исследования строится на комплексном подходе к специфике определения принципов проектирования колористики общественных пространств, морфологическом анализе, изучении научных, проектных и графических источников, веб-ресурсов, а также включает графоаналитический метод.

2. Модели и методы

Принципы проектирования цветовой среды общественных пространств.

Фундаментальным принципом в архитектурной композиции, не только касающейся цветового проектирования, но и в целом, в архитектуре и градостроительстве, является **принцип структурной целостности** [9]. Он состоит в формировании пространства, с учётом гармоничного цветового взаимодействия частей и целого, второстепенных деталей и главного элемента, с образно-художественным и знаково-символическим акцентированием последнего, в отношении к второстепенным элементам композиции и фоновому цветовому контексту. Кроме того, принцип структурной целостности, с учётом того, что цвет является мощным средством архитектурного языка, состоит в формировании единой образно-смысловой колористической системы, при этом, цвето-композиционным центром, в зависимости от иерархического уровня проектирования, может являться:

- сам город, с учётом динамики цветовой палитры окружающего природного контекста;
- исторический центр или район города (уровень генплана города);
- улица, площадь, ансамбль, транспортный и градообразующий узел (в структуре района);
- отдельное здание (в структуре улицы, площади, ансамбля);
- архитектурная деталь, пластический декор на фоне стены здания (см. рисунок 1)



Рисунок 1 – Принцип структурной целостности цветового взаимодействия частей и целого.
Сост. А. Гурьев.

«Приёмы цветового решения, основанные на принципе единства структуры и цвета сооружения, направлены на выявление тектоники и масштабности архитектурной формы. Соподчинение цвета и формы является залогом усиления эмоционального воздействия архитектуры» [10].

Концепция «единой колористической системы», при формировании цветовой среды общественных пространств города, может заключаться в объединении центрального элемента, в качестве которого может являться цветовая среда интерьера какого-либо здания (внутреннее пространство) с цветовым бассейном окружающего природного и архитектурного контекста (внешнее пространство), посредством возможного обустройства цветовых буферных (переходных) пространств.

Ключевой *принцип цветовой гармонии* архитектурного пространства неразрывно связан с вышеупомянутым принципом «Целостности». Он воплощает органичную связь между всеми элементами цветового композиционного поля, между архитектурными объёмами и пространством, посредством всего инструментария, имеющегося в наличии и распоряжении дизайнера, архитектора и градостроителя для целенаправленного формирования эстетически полноценной цветовой среды, состоящей из разнохарактерных общественных пространств города. Принцип цветовой гармонии, при формировании колористики общественных пространств, напрямую связан с основными композиционными средствами: тектоника, пропорциональное соотношение цветовых масс, контраст по цвету, светлоте и насыщенности, цветовой нюанс, ритмические и метрические членения и проч. Интерпретируя 5 принципов, предложенных В. Ганзеном, а именно: *повторяемость целого в его частях, соподчинённость частей в целом, принцип соразмерности частей в целом, принцип уравновешенности частей и принцип единства* [11], [12. С. 1-3] вполне могут быть использованы при формировании цветовой среды общественных пространств города. Истоки прекрасного Мис ван дер Роэ видел в целостности, воплощении «абсолютной идеи», «высшей гармонии», во внутренней уравновешенности формы, в математической чистоте её пропорций [13, С. 366]. Принцип цветовой гармонии предусматривает использование средств и приёмов, способных сообщить композиции художественную выразительность, образность и смыслы, в зависимости от концептуальной идеи автора, с использованием цветовых и светлотных контрастов, цветовой нюансировки, изменений цвета по насыщенности. «Цветовая гармония городской среды во многом зависит от ее наполненности динамикой социально-пространственных и социально-культурных процессов и способности понимания их цветового толкования [14, С. 143].

Существенно важным принципом в формировании общественных пространств является *принцип динамики*, который предполагает не только динамическое построение (см. рисунок 2) и восприятие цветовой композиции (см. рисунок 3).



Рисунок 2 – Принцип динамического построения цветовой системы.
Сост. А. Гурьев.



Рисунок 3 – Структурная схема замкнутого цикла восприятия цвета в условиях городского пространства.
Типы изменений колориметрических параметров цветового стимула с целью динамического построения цветовой системы (по Ю.Н. Датчуку) [15].
Сост. А. Гурьев.

Принцип динамизма проявляется в преобразованиях границ и геометрии пространства, в перемене цветовых образов и смыслов, изменениях функциональной принадлежности объекта (в силу определённых причин), отражается в метаморфозах и корректировке пластики форм и цвета, с учётом изменений моды и стилистической направленности.

Давно и хорошо известный людям всех научных и творческих профессий: художникам, скульпторам, рисовальщикам, живописцам, режиссёрам - **принцип «от общего к частному»**, был предложен в 1978 году архитектором В. И Кравцом [16, С 12], [17], при проектировании колористики жилого района. Этот принцип позволяет обеспечить целостность и колористическое единство с природным окружением, помогает избежать случайности, хаотичности и неоправданных цветовых диссонансов. Автор выделяет три уровня и три масштаба восприятия зрителем застройки: первый, когда значительная масса застройки воспринимается зрителем на фоне окружающей природной цветовой среды, второй уровень

восприятия отдельных зданий на фоне застройки; третий – восприятие архитектурной детали на фоне стены здания (см. рисунок 4)



*Рисунок 4 – Принцип «от общего к частному».
Сост. А. Гурьев.*

Принцип контекстной обусловленности (социальный контекст, цветовой контекст природной и архитектурной среды) предполагает учёт внешних факторов, определяющих цветовую концепцию объекта проектирования, а именно: изменяющееся по временам года многоцветье природного окружения, традиции цветовой национальной культуры (цветовые образы и символы, цветовые предпочтения местного населения), колорит исторической архитектуры различной стилевой направленности, выявление цветом формы исторически сложившийся планировочной городской структуры [18].,

Принцип интеграции внутренних и внешних пространств [19], органично раскрывает частный случай принципа цветовой контекстности, состоящий в синтезе и во взаимосвязанности полихромии этих сред. Цветовая интеграция внутренних и внешних пространств может быть реализована с помощью композиционных приёмов, которые архитектор использует в зависимости от авторской образно-концептуальной идеи и объекта проектирования, иерархические уровни которого были упомянуты выше, в описании принципа структурной целостности. Дворовое пространство дома (жилого комплекса) является внутренним по отношению к внешнему пространству улицы, но внешним, в отношении к внутреннему интерьерному пространству квартиры. Городская среда является внутренним по отношению к внешнему пространству природного окружения, но внешним, по отношению к внутренним пространствам улиц и площадей (см. рисунок 5).



*Рисунок 5 – Принцип интеграции цветовой среды внутренних и внешних пространств города.
Сост. А. Гурьев.*

Принцип интеграции колористики внутренних и внешних пространств может использовать следующие универсальные цвето-композиционные приёмы:

- приём цветового противопоставления (контраст) подразумевает целостное композиционно-художественное решение на основе цветового, светлотного контраста, или контраста по цветовой насыщенности, а возможно, для усиления эффекта, всех трёх типов контрастов. Контраст – самое мощное композиционное средство, способное честно и бескомпромиссно заявить: - «Это – внутреннее пространство, а это – внешнее, или это – одно, а это – совершенно другое», а всё вместе составляет единое целое;

- приём с использованием переходного цветового участка («буфер») предусматривает создание буферной цветовой зоны в границах соприкосновения полихромии внешних и внутренних пространств. Этот приём не такой жёсткий и конфликтный, как приём цветового противопоставления, он скорее взаимоприемлемый компромисс, с тонкой и мягкой нюансировкой переходного участка;

- приём цветового подобия предполагает единое колористическое решение внутреннего и внешнего пространства, как продолжение одной колористической темы в объёмно-пространственной композиции этих двух типов пространств. Пример цветового подобия приводит А.В. Ефимов, описывая масштабные цветовые мероприятия в г. Турине и других городах Италии, проводимые в 1980 году под руководством Джованни Бруно. Он использует термин «принцип гибкого одноцветия» [20], [21], когда концепция цветового решения заключается в использовании одного цветового тона. В случае с городами Италии – это был оригинальный цвет исторических зданий «туринский жёлтый», которым в процессе реставрационных работ было окрашено более 2-х тысяч зданий [22]. (см. рисунок 6).



Рисунок 6 – Композиционные приёмы интеграции внутренних и внешних пространств:
а) контраст - приём цветового противопоставления; б) «буфер» - приём с использованием переходного цветового участка; в) нюанс - приём цветового подобия.
Сост. А. Гурьев.

Композиционный приём – это способ использования художественных средств, он одновременно может являться и принципом, если это сущностный метод архитектурной композиции, занимаемый базовое положение в теории, например, принцип цветового нюанса (цветосочетание по аналогии), принцип цветового контраста (цветосочетание на противопоставлении) [23], [24]. Принцип контрастных цветовых сопоставлений, к примеру, проявился ещё в Древней Греции, когда зодчие окрашивали верхние части храмов в яркие насыщенные цветовые тона, что обеспечивало хорошую ориентацию в городском пространстве, возможность видеть храмы издалека и акцентировать их значимость [25].

3. Результаты исследования и их анализ

В результате проведённого исследования систематизированы и обоснованы ключевые принципы проектирования колористической среды городских общественных пространств, которые формируют теоретико-методическую основу для целенаправленного управления цветовым образом города.

1. Систематизация принципов проектирования. На основе анализа факторов, влияющих на формирование цветовой среды (природно-климатических, социально-экономических, культурно-региональных и морфолого-пространственных), были выявлены и структурированы шесть взаимосвязанных принципов:

Принцип структурной целостности: определяет необходимость создания единой образно-смысловой колористической системы, в которой цветовые решения второстепенных элементов, главных акцентов и фона находятся в гармоничном соподчинении. Принцип действует на всех иерархических уровнях — от города в целом до архитектурной детали.

Принцип цветовой гармонии: предполагает достижение эстетически полноценной среды через органичную связь всех элементов цветового поля с использованием композиционных средств (контраст, нюанс, ритм, пропорция).

Принцип динамизма: учитывает изменчивость цветовой среды во времени и пространстве, обусловленную сезонными метаморфозами природного контекста, функциональными трансформациями, сменой стилистических предпочтений и социально-культурной динамикой.

Принцип «от общего к частному»: задаёт методологическую последовательность проектирования, обеспечивающую колористическое единство объекта с более крупным окружением (природным, градостроительным) и предотвращающую хаотичность решений.

Принцип контекстной обусловленности: требует учёта внешних детерминант, таких как колорит природного ландшафта, историческая полихромия, цветовые традиции и символы местной культуры.

Принцип интеграции внутренних и внешних пространств: направлен на создание визуальной и смысловой взаимосвязи между полихромией интерьеров и экsterьеров через специфические композиционные приёмы.

2. Разработка композиционных приёмов интеграции. В рамках принципа интеграции были детализированы и визуализированы три ключевых приёма для гармонизации цветовых сред разного типа:

Приём цветового противопоставления (контраст): чёткое разграничение пространств через контраст по цвету, светлоте или насыщенности для акцента на их функциональной или образной самостоятельности в рамках целого.

Приём с использованием переходного цветового участка («буфер»): создание мягкой, нюансированной переходной зоны, смягчающей границу между контрастными средами и обеспечивающей их плавное визуальное взаимодействие.

Приём цветового подобия (нюанс): объединение пространств через использование сходной или единой цветовой гаммы, создающее эффект непрерывности и колористического единства (например, «гибкое одноцветие»).

Анализ результатов позволяет утверждать, что предложенная система принципов носит комплексный характер. Принципы не изолированы, а находятся в отношениях взаимодополнения и иерархии. Так, принципы структурной целостности и гармонии задают общую философско-эстетическую цель, в то время как принципы контекстной обусловленности, «от общего к частному» и динамизма определяют методологический подход и ограничения на разных стадиях проектирования. Принцип интеграции, в свою очередь, предлагает конкретный инструментарий для решения одной из центральных задач — синтеза разнородных пространств.

Практическая значимость результатов заключается в формировании структурированного алгоритма действий для архитекторов и дизайнеров. Последовательное применение данных принципов позволяет перейти от интуитивного или стихийного

использования цвета к осознанному, научно обоснованному проектированию, которое учитывает многослойность городского контекста и способствует созданию уникального, гармоничного и психологически комфортного цветового образа общественных пространств города.

4. Заключение

1. В результате исследования определена группа ключевых факторов, оказывающих комплексное влияние на процесс проектирования цветовой среды общественных пространств города: природно-климатические, социально-экономические, культурно-региональные (цветовая культура) и морфолого-пространственные (объёмно-пространственная и градостроительная структура). Установлено, что учёт этих факторов является обязательным условием для формирования контекстуально-обусловленной и устойчивой колористики.

2. В рамках принципа интеграции конкретизированы и визуализированы три базовых композиционных приёма гармонизации полихромии интерьерных и экsterьерных пространств: приём цветового противопоставления (контраст), приём с использованием переходной буферной зоны и приём цветового подобия (нюанс). Данные приёмы представляют собой практический инструментарий для реализации теоретических принципов.

3. Установлена логическая зависимость между факторами, принципами и приёмами проектирования. Факторы формируют контекст и ограничения, принципы задают стратегические направления и правила формирования цветовой среды, а конкретные приёмы служат тактическими средствами для их реализации. Это позволяет перейти от интуитивного к системному, научно обоснованному проектированию колористики городских общественных пространств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ожегов, С.И. Толковый словарь русского языка / С. И. Ожегов; Российская АН, Ин-т рус. яз., Российский фонд культуры. – М.: Азъ, 1994. – 907 с.
2. Елизаров В.Ж. Влияние региональных особенностей на формирование колористики современного города: автореферат дис. ... кандидата архитектуры: 18.00.01 / ВНИИ теории архитектуры и градостроительства. - Москва, 1992. - 24 с.
3. Грибер Ю.А. Монохромная модель городской колористики // Урбанистика. 2017. № 2. С. 58-64.
4. Lenclos J.-Ph., Lenclos D. Colors of the world: the geography of color; preface by F. Barré; translated by G. Bruhn. New York: Norton, 2004. 288 p.
5. Цвет в пространстве города: сборник статей зарубежных авторов / под ред. Ю.А. Грибера. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2015. 156 с.
6. Железняк О. Е. Цвет, город, культура: монография / О. Е. Железняк; М-во образования и науки РФ, Иркутский гос. технический ун-т. — Иркутск: Изд-во Иркутского гос. технического ун-та, 2013. — 306 с.
7. Гурьев С. Н. Колористика в реконструкции исторически сложившихся районов города: на примере ЦЧЭР: дис. ... канд. архитектуры: 18.00.04: защищена 22.02.90: утв. 15.07.05 / Гурьев С. Н. – Ленинград: ЛИСИ., 1990. - 211 с.: ил.
8. Янковская, Ю. С. Образ и морфология архитектурного объекта / Ю. С. Янковская. – Екатеринбург: изд-во УрГАХУ, 2004.
9. Яргина З.Н. Эстетика города / З. Н. Яргина. – М.: Стройиздат, 1991. - 365,[1] с.: ил.
10. Иконников, А.В. Основы архитектурной композиции. / А.В. Иконников, Г.П. Степанов. – М.: Искусство, 1971. – 224 с.
11. Ганzen В.А. Восприятие целостных объектов / Ленингр. гос. ун-т им. А. А. Жданова. - Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. - 152 с.
12. Ганцен В.А. О принципах гармонии // Техническая эстетика. - 1969, №4 – С. 1-3.
13. Мис ван дер Роэ, Л. О форме в архитектуре // Мастера архитектуры об архитектуре / под общ. ред. А.В. Иконникова [и др.]. М.: Искусство, 1972. С. 365–36
14. Ефимов А.В. Колористика города. / А. В. Ефимов - М.: Стройиздат, 1990. – 272 с.: ил.
15. Датчук Ю.Н. Формирование полихромии общественного центра крупного города: Автореф. дис. ... канд. архитектуры. –Л., ЛИСИ, 1983. -25 с.

16. Кравец В.И. Функция цвета в городской застройке // Архитектура СССР, 1978, № 9, с. 10-12.
17. Кравец, В.И. Структура и функции цветовой гармонии в композиции жилой застройки: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата архитектуры. (00.01) / Харьк. инж.-строит. ин-т. - Харьков: [б. и.], 1972. - 28 с.
18. Грибер Ю. А. Теория цветового проектирования городского пространства: монография / Ю. А. Грибер. – М.: Согласие, 2017. - 176, [1] с.: ил.
19. Радулова, Я.И. Особенности интеграции внутреннего и внешнего пространства в архитектуре малоэтажного жилища: автореферат дис. ... кандидата архитектуры: 05.23.20 / Я.И. Радулова; [Место защиты: Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т]. – Нижний Новгород, 2017. – 27 с.
20. Ефимов, А.В. Дизайн архитектурной среды – архитектурная профессия // ACADEMIA, Архитектура и строительство, 2019, № 3, с. 18-27.
21. Ефимов А.В. Из опыта проектирования колористики исторических городов. Архитектура и современные информационные технологии. / А.В. Ефимов, Н.Г. Панова. МАРХИ, № 4 (37), 2016, С. 250-265
22. Brino, G. Il Piano del Colore di Torino (1979–1980) / G. Brino. – Casabella 476/477. – P. 59–60
23. Yu B., Bell S. Emerging colours: new trends, demands and challenges in contemporary urban environments //Cultura e Scienza del Colore-Color Culture and Science. – 2020. – Т. 12. – №. 01. – С. 32-39.
24. Cabarkapa A., Djokic L. Importance of the color of light for the illumination of urban squares //Color Research & Application. – 2019. – Т. 44. – №. 3. – С. 446-453.
25. Грибер Ю.А. Цветовое поле города в истории европейской культуры: монография / Ю. А. Грибер. – М.: Согласие, 2012. – 302 с.

REFERENCES

1. Ozhegov, S.I. Explanatory Dictionary of the Russian language / S. I. Ozhegov; Russian Academy of Sciences, Institute of Russian Language, Russian Cultural Foundation. Moscow: Az, 1994. 907 p.
2. Elizarov V.J. The influence of regional features on the formation of the coloristics of a modern city: abstract of the dissertation of the Candidate of Architecture: 18.00.01 / All-Russian Research Institute of Theory of Architecture and Urban Planning. - Moscow, 1992. - 24 p.
3. Griber Yu.A. Monochrome model of urban coloristics // Urbanistics. 2017. No. 2. pp. 58-64.
4. Lenclos J.-Ph., Lenclos D. Colors of the world: the geography of color; preface by F. Barré; translated by G. Bruhn. New York: Norton, 2004. 288 p.
5. Color in the city space: a collection of articles by foreign authors / edited by Yu.A. Griber. Smolensk: SmolGU Publishing House, 2015. 156 p.
6. Zheleznyak O. E. Color, city, culture: a monograph / O. E. Zheleznyak; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Irkutsk State Technical University. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2013. 306 p.
7. Guryev S. N. Coloristics in the reconstruction of historically developed areas of the city: on the example of the Central Research Institute: dissertation of the cand. Architecture: 18.00.04: protected on 22.02.90: approved on 15.07.05 / Guryev S. N. – Leningrad: LISI., 1990. - 211 p.: ill.
8. Yankovskaya, Yu.S. The image and morphology of an architectural object / Yu. S. Yankovskaya. Yekaterinburg: publishing house of Urgakha, 2004.
9. Yargina Z.N. Aesthetics of the city / Z. N. Yargina. Moscow: Stroyizdat, 1991. 365,[1] p.: ill.
10. Ikonnikov, A.V. Fundamentals of architectural composition. / A.V. Ikonnikov, G.P. Stepanov. Moscow: Iskusstvo Publ., 1971. 224 p.
11. Ganzen V.A. Perception of integral objects / Leningrad State University named after A. A. Zhdanov. Leningrad: Publishing House of the Leningr University, 1974. 152 p.
12. Ganzen V.A. On the principles of harmony // Technical aesthetics. 1969, No. 4– pp. 1-3.
13. Mies van der Rohe, L. On form in architecture // Masters of architecture on architecture / under the general editorship of A.V. Ikonnikov [et al.]. Moscow: Iskusstvo, 1972. pp. 365-36
14. Efimov A.V. Coloristics of the city. / A.V. Efimov, Moscow: Stroyizdat, 1990, 272 p. (in Russian)
15. Datchuk Yu.N. Formation of polychromy of the public center of a large city: Abstract of the dissertation. ... kand. architecture. –L., LISI, 1983. -25 p.
16. Kravets V.I. The function of color in urban buildings // Architecture of the USSR, 1978, No. 9, pp. 10-12.
17. Kravets, V.I. The structure and functions of color harmony in the composition of residential buildings: Abstract of the dissertation. for the degree of Candidate of Architecture. (00.01) / Kharkiv. eng.-builds. in-T. - Kharkov: [B. I.], 1972. - 28 p.
18. Griber Yu. A. Theory of color design of urban space: a monograph / Yu. A. Griber. – M.: Consent, 2017. - 176, [1] p.: ill.
19. Radulova, Ya.I. Features of the integration of internal and external space in the architecture of low-rise housing: abstract of the dissertation. ... candidate of Architecture: 05.23.20 / Ya.I. Radulova; [Place of protection: Nizhegovod State Architectural-builds. university]. – Nizhny Novgorod, 2017. – 27 p.

20. Efimov, A.V. Design of the architectural environment is an architectural profession // ACADEMIA, Architecture and Construction, 2019, No. 3, pp. 18-27.
21. Efimov A.V. From the experience of designing the coloristics of historical cities. Architecture and modern information technologies. / A.V. Efimov, N.G. Panova. MARKHI, No. 4 (37), 2016, pp. 250-265
22. Brino, G. Il Piano del Colore di Torino (1979–1980) / G. Brino. – Casabella 476/477. – P. 59–60
23. Yu B., Bell S. Emerging colours: new trends, demands and challenges in contemporary urban environments //Cultura e Scienza del Colore-Color Culture and Science. – 2020. – T. 12. – №. 01. – C. 32-39.
24. Cabarkapa A., Djokic L. Importance of the color of light for the illumination of urban squares //Color Research & Application. – 2019. – T. 44. – №. 3. – C. 446-453.
25. Griber Yu.A. The color field of the city in the history of European culture: a monograph / Yu. A. Griber. – M.: Consent, 2012. – 302 p.

Информация об авторах:

Гурьев Александр Сергеевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия, старший преподаватель кафедры основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: alex.s.guru@gmail.com

Енин Александр Егорович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия, канд. архитектуры, профессор, заведующий кафедрой основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: a_yenin@mail.ru

Гурьев Сергей Николаевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия, кандидат архитектуры, профессор кафедры основ проектирования и архитектурной графики,
E-mail: gurudesign@mail.ru

Information about authors:**Guryev, Alexander S.**

VSTU, Russia, Voronezh, Senior Lecturer at the Department of OP and AG,
E-mail: alex.s.guru@gmail.com

Yenin Alexander E.

VSTU, Russia, Voronezh, Candidate of Sciences. Architecture, Professor, Head of the Department of OP and AG,
E-mail: a_yenin@mail.ru

Guryev Sergey N.

VSTU, Russia, Voronezh, Candidate of Architecture, Professor of the Department of OP and AG,
E-mail: gurudesign@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025

Одобрена после рецензирования 21.11.2025

Принята к публикации 25.11.2025

The article was submitted 18.11.2025

Approved after reviewing 21.11.2025

Accepted for publication 25.11.2025

Т.Ф. ЕЛЬЧИЩЕВА¹, П.В. МОНАСТЫРЕВ¹, В.А. ЕЗЕРСКИЙ¹, А.Т. ТАСКАЛИЕВ²

¹ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия

²ЧВПОУ «Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет»,

г. Уральск, Республика Казахстан

ПРИМЕНЕНИЕ ОПОКИ ШИПОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аннотация. Проведено исследование возможности применения в дорожном строительстве опоки Шиповского месторождения республики Казахстан в качестве самостоятельного материала и термолита, полученного из опоки. Целью исследования является разработка технологических параметров производства новых строительных материалов – опоки и термолита, а также регламента их применения в дорожном строительстве. Объект исследования – опока и полученный из неё термолит Шиповского месторождения республики Казахстан. Предмет исследования – свойства опоки и термолита и технологические параметры их включения в состав дорожной одежды автомобильных дорог III категории. Научная гипотеза – опока Шиповского месторождения республики Казахстан может использоваться в качестве самостоятельного материала или в виде термолита в составе дорожной одежды автомобильных дорог III категории. Научная новизна – с использованием современных методов исследования получены новые данные о физико-механических свойствах и минералогическом составе опоки Шиповского месторождения; получены новые данные о физико-механических свойствах и химическом составе термолита, полученного из опоки. Теоретическая значимость исследования заключается в получении экспериментальных данных о свойствах опоки и термолита, практическая значимость работы заключается в использовании результатов исследования для разработки состава асфальтобетонной смеси на основе термолита и применения ее в дорожном строительстве. Установлены основные физико-механические свойства опоки Шиповского месторождения Западно-Казахстанской области. Разработаны технологические параметры применения опоки в строительстве автомобильной дороги на участке Уральск (Республика Казахстан) – р. п. Озинки (Российская Федерация). В результате проведенных работ по исследованию состояния участка дороги после шестилетней эксплуатации установлено преимущество применения для строительства основания дороги опоки по сравнению с глиной. Разработана технология получения термолита, на которую по результатам проведенных испытаний получен сертификат качества продукции. Разработана технология производства асфальтобетонной смеси на основе термолита для строительства дорог, особенно в тех районах, где отсутствуют месторождения твердых горных пород для производства щебня, является весьма актуальной. Разработан состав асфальтобетонной смеси с использованием термолита, отличающийся преимуществом показателей по сравнению с существующими аналогами, что подтверждено результатами испытаний, проведенных в аккредитованных испытательных лабораториях, разрешающих применение разработанного состава асфальтобетонной смеси для строительства дорожного полотна автомобильных дорог III категории.

Ключевые слова: опока, термолит, асфальтобетон, дорожное полотно, основание дороги.

T.F. ELCHISHCHEVA¹, P.V. MONASTYREV¹, V.A. YEZERSKY¹, A.T. TASKALIEV².

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia

²HUE «West Kazakhstan University of Innovation and Technology», Uralsk, Republic of Kazakhstan

APPLICATION OF OPOKA FROM THE SHIPOVSKOE DEPOSIT OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN IN ROAD CONSTRUCTION

Abstract. A study was conducted on the use of opoka from the Shipovskoye deposit in the Republic of Kazakhstan and thermolite obtained from opoka in road construction. The aim of the study is to develop new technologies for the production of building materials - opoka and thermolite, and their use in road construction. The object of the study is opoka from the Shipovskoye deposit in the Republic of Kazakhstan. The subject of the study is the properties of opoka and thermolite and their work in the composition of the road pavement of category III highways. Scientific hypothesis - opoka from the Shipovskoye deposit in the Republic of Kazakhstan can be used as an independent material or as a thermolite in the composition of the road pavement of category III highways. Scientific novelty - using modern research methods, new data were obtained on the physical and mechanical properties and mineralogical composition of opoka from the Shipovskoye deposit; new data were obtained on the physical and mechanical properties and chemical composition of thermolite obtained from opoka. The theoretical significance of the study lies in obtaining experimental data on the properties of opoka and thermolite, the practical significance of the work lies in using the research results to develop the composition of asphalt concrete mixture based on thermolite and its application in road construction. The main physical and mechanical properties of opoka from the Shipovskoye deposit in the West Kazakhstan region were established. The use of opoka in the construction of a road on the section Uralsk (Republic of Kazakhstan) - the village of Ozinki (Russian Federation) was studied. As a result of the work carried out to study the state of the road section after six years of operation, the advantage of using opoka for the construction of the road base was established compared to clay. A technology for producing thermolite was developed, for which a product quality certificate was received based on the results of the tests. The development of a technology for the production of asphalt concrete mixture based on thermolite for road construction, especially in those areas where there are no deposits of hard rocks for the production of crushed stone, is very relevant. An asphalt concrete mixture composition has been developed using thermolite, which has an advantage in terms of indicators compared to existing analogues, which is confirmed by the results of tests conducted in accredited testing laboratories, permitting the use of the developed asphalt concrete mixture composition for the construction of road surfaces of category III highways.

Keywords: opoka, thermolite, asphalt concrete, road surface, road base.

1. Введение

Кремнистые породы состоят из минералов группы оксидов кремния – опала – аморфного кремнезема. Одна из разновидностей кремнистых пород – опока [1]. Опока состоит из микрозернистого опала, являющегося продуктом растворения и переотложения кремнистого вещества, прилипшего к скелетам диатомей (диатомеи, или диатомовые водоросли, представляют группу водорослей, отличающихся наличием у клеток «панциря» из диоксида кремния) [2].

В Республике Казахстан месторождение опоки в Западно-Казахстанской области простирается на десятки километров, площадь неразведанных месторождений измеряется сотнями квадратных километров, это сотни миллионов кубических метров опоки.

Крупным месторождением опоки в Западно-Казахстанской области Республики Казахстан является Шиповское месторождение, которое расположено в районе станции Шипово [3]. Месторождение находится в Прикаспийской впадине и располагается горизонтально в виде пластов палеоценового возраста [4]. Запасы опоки составляют по категориям А+В+С около 21619 тыс. м³ [5]. В настоящее время опока используется для строительства грунтовых дорог (рисунок 1, а).

В производстве строительных материалов и изделий из легких бетонов [6, 7] в качестве мелкого и крупного заполнителя также используется материал термолит [8, 9], который получают из опоки путем высокотемпературного обжига при температуре 1150–1200°C [10].

Отличием опоки от глины, которую используют для строительства грунтовых автомобильных дорог, является то, что глина становится пластичной при увлажнении водой, а опока обладает дренажными свойствами и, вследствие своей пористости, пропускает влагу, не накапливая ее на поверхности. Опока менее пластична, а также обладает меньшей липкостью, чем глина, что позволяет в весенний и осенний периоды осуществлять

передвижение автотранспортных средств практически без затруднений, что является значительным преимуществом при ее использовании.

а)



б)



в)



г)



Рисунок 1 – Грунтовая дорога с использованием опоки (а), автомобильная дорога второй категории г. Уральск – р.п. Озинки (б), участок дороги над водопропускной трубой с основанием из глины (в), участок дороги с основанием из глины над водопропускной трубой после ремонта (г)

В тех районах, особенно между небольшими населенными пунктами, где автомобильные дороги с твердым покрытием отсутствуют, использование опоки имеет широкое применение.

Участок автомобильной дороги общего пользования республиканского значения второй категории протяженностью г. Уральск (Республика Казахстан) – р.п. Озинки (Саратовская область, Российская Федерация) в районе станции Шипово был реконструирован в 2018 г. с использованием опоки (рисунок 1, б). Опока использовалась для подъема (увеличения высоты) насыпи основания дороги при расширении дорожного полотна с 6 до 9 м и в качестве отсыпки для откосов. При реконструкции выполнялось требование заказчика к устройству прямолинейного продольного профиля дороги (ранее он был волнообразным). Крутые спуски и подъемы на холмистой местности были выровнены, на таких участках досыпали опоку на высоту в среднем до 5–7 м от прежнего уровня. На некоторых участках поднятие насыпи составило примерно 12–15 м, что способствовало выравниванию дороги и предотвращению наблюдающихся ранее аварий большегрузных автомобилей в зимний период, особенно во время гололедицы. Опока здесь использовалась в качестве основания дорожного полотна и устройства насыпи дороги с асфальтобетонным покрытием. При ширине проезжей части 9 м нагрузка на ось автомобиля составляла 13 т при расчетной интенсивности движения 4403 автомобиля в сутки.

Проведенные натурные исследования позволили установить, что в результате шестилетней эксплуатации дороги, выполненной с использованием опоки, на участке с водопропускными трубами повреждений в виде сетки трещин, просадок, сдвигов не наблюдается. К особенностям местности следует отнести то, что участок, где использовалась опока, заболочен, с выходом на поверхность стоячих грунтовых вод (рисунок 1, в), что создавало худшие условия для эксплуатации, в отличие от участков дороги с основанием из глины. На всех участках дороги, где при реконструкции производилась замена старых водопропускных труб на новые, для устройства основания с нуля использовалась опока.

На участках дороги, где использовалась глина, для укрепления применялся геотекстиль, а на участках с опокой геотекстиль не использовался, что не снизило качество дорожного полотна. Согласно ГОСТ 32804-2014 «Материалы геосинтетические для фундаментов, опор и земляных работ», геотекстиль применяют в основании дорожного покрытия для его защиты от разрушительных процессов и предотвращения выпучивания и разрушение грунта [11, 12]. Геотекстиль также повышает устойчивость дорожного покрытия, способствует укреплению и равномерному распределению нагрузки, защищает основание дороги от вымывания и размыва, улучшает дренажные свойства дорожного полотна, сохраняет его целостность и стабильность [13]. Геотекстиль укладывают первым слоем, отделяющим всю дорожную систему от грунта, а также в качестве разделительного слоя между песком и щебнем.

На участках автомобильной дороги, где основанием дорожного покрытия являлась глина и применялся геотекстиль, практически во всех местах строительства водопропускных труб наблюдалась просадка дорожного полотна, что потребовало проведения ремонтных работ (рисунок 1, г). Такое наблюдение натолкнуло на более детальное изучение физико-механических свойств материалов, использованных в строительстве данного участка дороги.

Научная гипотеза состоит в предположении, что опока Шиповского месторождения республики Казахстан может использоваться в качестве самостоятельного материала или в виде термолита в составе дорожной одежды автомобильных дорог III категории. Для подтверждения научной гипотезы была поставлена цель научноисследовательской работы – разработка технологических параметров производства новых строительных материалов – опоки Шиповского месторождения и термолита, а также регламента их применения в дорожном строительстве.

Задачами исследования по использованию опоки Шиповского месторождения, расположенного в Западно-Казахстанской области Республики Казахстан, и продукта из опоки – термолита, полученного высокотемпературным обжигом, являются: изучение Шиповского месторождения и отбор проб опоки; изучение способов применения опоки в дорожном строительстве; натурные исследования участка дороги с водопропускными системами с применением глины и опоки; установление особенностей использования опоки и глины; разработка технологии изготовления из опоки термолита; проектирование состава горячей асфальтобетонной смеси на основе термолита для автомобильных дорог III категории.

Такие повреждения дорожного покрытия влекут за собой снижение скоростного режима. Резкое торможение транспортных средств приводит к уменьшению дистанции между ними, вызывая аварийные ситуации, особенно во время гололеда. Перепад слоя дорожного полотна даже после ремонта остается и со временем из-за просадки основания дороги он может увеличиваться, что влечет уменьшение межремонтных сроков и частый ремонт. Ремонт даже небольшого участка дороги республиканского значения создает ограниченность движения. При этом увеличиваются затраты дорожных организаций, вызванные такими повреждениями, на техническое содержание дорог [14, 15].

Физико-механические свойства опоки должны соответствовать требованиям нормативных документов для строительства оснований для всех категорий автомобильных дорог, особенно при проектировании дорог в условиях водонасыщенных грунтов [16–19].

При решении задач исследования предполагалось использование опоки в двух видах. Во-первых, она применяется как самостоятельный материал для дорожного строительства, когда определяются основные свойства опоки, положительно отличающие ее от других материалов, используемых для строительства оснований дорог (например, глины). Во-вторых, применяется продукт переработки опоки – термолит (гранулы) в составе асфальтобетона для устройства дорожного полотна. При этом определяются физико-механические свойства, материалов и категории дорог, для строительства которых эти материалы будут применяться в будущем.

2. Модели и методы

Изучение свойств опоки в лабораторных условиях проводились в соответствии с ГОСТ 22263-76 «Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия». Физико-механические исследования опоки проводились в соответствие с ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

Месторождение опоки изучалось визуально, был проведен отбор проб на различной глубине в точках по периметру месторождения согласно схеме участка (Рисунок 2).

Для изучения физико-механических свойств опоки были отобраны образцы фракции менее 40 мм. Результаты ситового анализа опоки показали, что содержание фракций с размерами до 40 мм составило: фракция 20 – 40 мм – от 29,9 до 31,1 %, фракция 10 – 20 мм – от 15,2 до 15,4 %, фракция 5 – 10 мм – от 3,8 до 4,2 %, фракция до 5 мм – 1,9 – 2,1 %.

3. Результаты исследования и их анализ

Для установления особенностей использования при строительстве дорог глин различных месторождений и опоки Шиповского месторождения был проведен сравнительный анализ их свойств. В работе [18] были проведены лабораторные исследования разработанных месторождений Западно-Казахстанской области Погодаевского (глина) и Чаганского (суглинок). Полученные данные числа пластичности глин сравнивались с числом пластичности глины Туксайского месторождения и опоки Шиповского месторождения (см. таблицу 1). Разделение на группы проводилось в соответствие с ГОСТ 9169-75 «Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация».



*Рисунок 2 – Схема отбора проб опоки на Шиповском месторождении.
x - точка отбора проб, h - глубина отбора проб от уровня земли*

Таблица 1 – Число пластичности сырья

Наименование сырья и месторождения	Число пластичности по результатам лабораторных испытаний	Наименование групп в соответствии с ГОСТ 9169-75
Глина Погодаевского месторождения [18]	26,5	Высокопластичные (свыше 25)
Глина Туксайского месторождения	26,2	Высокопластичные (свыше 25)
Суглинок Чаганского месторождения [18]	11,5	Умереннопластичные (7–15)
Опока Шиповского месторождения	5	Малопластичные (3–7)

В результате проведенных исследований установлено, что опока, согласно ГОСТ 9169–75, относиться к группе малопластичных материалов.

Опока обладает лучшими дренажными свойствами по сравнению с глиной, благодаря чему опока применяется в промышленности в качестве сорбента, также опока обладает меньшей липкостью, чем глина, что облегчает продвижение и работу спецтехники.

Дальнейшее изучение физико-механических свойств опоки проводилось для фракций 5 – 10, 10 – 20 и 20 – 40 мм. Результаты лабораторных исследований по определению физико-механических свойств опоки представлены в таблице 2 [21, 22].

Таблица 2 – Физико-механические свойства опоки

Размер фракций, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/м×К
5 – 10	635 – 640	27 – 28	3,4 – 3,5	0,11 – 0,12
10 – 20	620 – 625	26 – 27	3,8 – 3,9	0,08 – 0,09
20 – 40	585 – 590	25 – 26	4,0 – 4,1	0,06 – 0,07

Наибольшую насыпную плотность, составляющую 635 – 640 кг/м³, имеет фракция 5 – 10 мм, все фракции имеют водопоглощение 25 – 28 %, прочность выше у фракции 20 – 40 мм, она составляет 4,0 – 4,1 МПа. Самая низкая теплопроводность у фракции 20 – 40 мм, она составляет 0,06 – 0,07 Вт/м ×К.

Прочность определялась с помощью пресса ПГМ-50МГ4, а теплопроводность – прибором ИТП-МГ-4 «ЗОНД» по ГОСТ 30256-94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом».

По результатам минералого-петрографического анализа в соответствии с ГОСТ 33031-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение минералого-петрографического состава» определено содержание опаловой массы, имеющей наибольшее количество по сравнению с другими составляющими – 69,55%.

По уменьшению содержания в опоке минералы располагаются в следующем порядке: глинистые минералы – 15,56 %, цеолит – 3,2%, гидроксид железа – 2,73%, глауконит – 2,2%, полевой шпат – 1,03 %, слюда – 2,19 %, кварц – 1,75%, кальцит – 0,9 %, органика углефицированная – 0,75%.

Для устройства покрытия при ремонте дороги изготавливается асфальтобетон, где в качестве легкого заполнителя использовался термолит, полученный из опоки путем высокотемпературного обжига в соответствии с требованиями ГОСТ 56507-2015 «Заполнители термолитовые на основе кремнистого сырья. Технические условия».

Свойства термолита определялись согласно ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Для изготовления термолита для лабораторных исследований использовалась муфельная лабораторная электропечь SNOL 6,7/1300. Обжиг опоки фракций 5 – 10 мм, 10 – 20 мм и 20 – 40 мм производился при температуре 1150 °C.

В лаборатории инженерного профиля «ИРГЕТАС» Восточно-Казахстанского государственного технического университета имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан, был проведен анализ всех элементов термолита в 5 спектрах с использованием растрового электронного микроскопа JSM 6390LV (ГОСТ Р 8.631-2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки» (Рисунок 3).

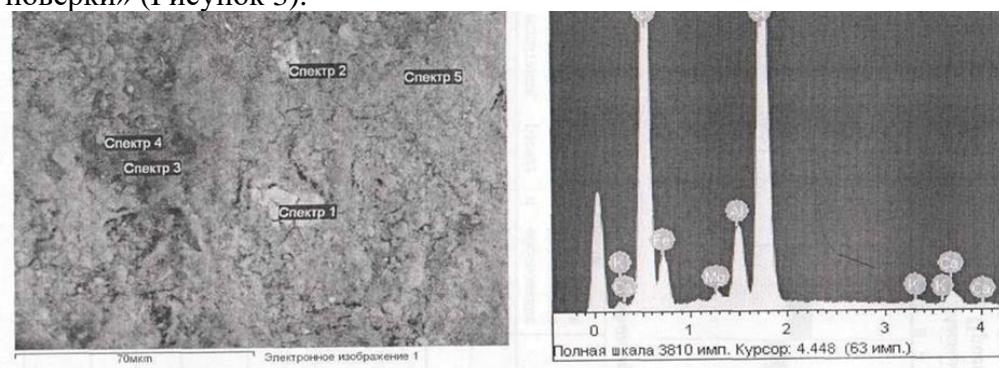


Рисунок 3 – Спектральный анализ термолита

Получены следующие результаты химического состава: кислород O (54,43 – 61,40 %), натрий Na (0,63 – 2,52 %), магний (0,57 – 1,01 %), алюминий Al (3,73 – 4,82 %), кремний Si (19,92 – 30,94 %), сера S (0,46%), хлор (0,24 – 2,05 %), калий (0,29 – 1,68 %), кальций Ca (0,54 – 0,99 %), титан Ti (0,16 – 0,19 %), железо Fe (2,49 – 19,01 %) (см. таблицу 3).

По результатам измерений удельной эффективной активности ЕРН, проведенным отделом испытаний Западно-Казахстанского филиала АО «Национальный центр экспертизы и сертификации», термолит, полученный промышленным способом, прошел сертификацию по ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» на пригодность в строительстве. Полученный термолит получил сертификат №1395435, выданный АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» Республики Казахстан, подтверждающий его соответствие требованиям безопасности (качества) в строительстве. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов составила 28 ± 6 Бк/кг, что значительно ниже нормативного значения (не более 370 Бк/кг). Материалу присвоен I класс, что позволяет применять полученный термолит во всех видах строительства.

Таблица 3 – Химический состав термолита

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Спектр 1	55,07		0,57	4,15	19,92			0,29	0,99		19,01
Спектр 2	54,77		0,75	4,07	22,85			0,53	0,57	0,19	16,26
Спектр 3	54,43	2,52	0,73	3,73	30,94	0,46	2,05	1,68	0,98		2,49
Спектр 4	61,40	0,63	0,87	4,37	27,06		0,24	0,76	0,54	0,17	3,97
Спектр 5	58,85		1,01	4,82	28,19			0,67	0,58	0,16	5,71
Макс.	61,40	2,52	1,01	4,82	30,94	0,46	2,05	1,68	0,99	0,19	19,01
Мин.	54,43	0,63	0,57	3,73	19,92	0,46	0,24	0,29	0,54	0,16	2,49

Результаты проведенных испытаний по определению физико-механических свойств термолита приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний термолита

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя
1	Насыпная плотность, кг/м ³	850 – 950
2	Марка по дробимости	не ниже 1000
3	Удельная эффективная активность ЕРН, Бк/кг	28 – 30
4	Марка по морозостойкости	не ниже F25
5	Марка по истираемости	не ниже И1
6	Теплопроводность, Вт/м×К	0,10 – 0,12
7	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, %	0,24
8	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,2
9	Содержание зерен слабых пород, %	3,1

Лабораторные исследования асфальтобетона для дорожного покрытия проводились в испытательной лаборатории АО «Уральскдорстрой», г. Уральск, Республика Казахстан в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» и Государственным стандартом Республики Казахстан СТ РК 1218-2003 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний».

В соответствии с ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов» запроектирован состав асфальтобетонной смеси (горячая, плотная, мелкозернистая типа Б, для верхнего покрытия дорог).

Смесь включает, % по массе: термолит фракции 10 – 20 мм – 37%; отсев дробления природного щебня (фракция менее 5 мм), производитель Мугалжарский щебеночный завод, г.Актобе, Актюбинская область, Республика Казахстан – 37%; песок (ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия») – 14%; минеральный порошок (ТОО

«Kazfarina», г. Актобе, Актыбинская область, Республика Казахстан) – 6%; битум, ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия» (производства ТОО СП «Caspi Bitum», г. Актау, Мангистауская область, Республика Казахстан) – 6%.

Результаты проведенных испытаний по определению физико-механических свойств асфальтобетонных образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты испытаний образцов асфальтобетона

№	Наименование показателя	Нормативное значение	Результаты эксперимента
1	Средняя плотность уплотненной смеси, г/см ³	Не нормируется	2,21
2	Водонасыщение, % (об.)	1,5 – 4,0	4,02
3	Предел прочности при сжатии, МПа: при $t=50^{\circ}\text{C}$ при $t=20^{\circ}\text{C}$	$\geq 1,2$ $\geq 2,2$	1,42 3,8
4	Водостойкость	$\geq 0,8$	0,88

4. Заключение

1. Установлена принципиальная возможность эффективного использования опоки Шиповского месторождения и получаемого из неё термолита для строительства конструктивных слоёв дорожных одежд, что подтверждается их соответствием требованиям нормативных документов.

2. Доказано преимущество применения опоки по сравнению с традиционными материалами (на примере глины) при строительстве основания автомобильной дороги Уральск – Озинки.

3. Разработаны и сертифицированы технология получения термолита и усовершенствованный состав асфальтобетонной смеси на его основе, которые показали лучшие характеристики по сравнению с аналогами и разрешены к применению на дорогах III категории.

Определена актуальность и перспектива данных разработок для регионов с дефицитом каменных материалов, а также следующая цель — создание состава смеси для дорог I-II категорий. Представленное исследование расширяет область применения опоки и термолита для строительства автомобильных дорог. С учетом результатов проведенных исследований, дальнейшая работа заключается в разработке состава асфальтобетонной смеси с использованием термолита для автомобильных дорог I-II категорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здорик Т.Б., Фельдман Л.Г., Тимофеев И.Н., Матиас В.В. Минералы и горные породы СССР. Москва: Мысль, 1970. 488 с.
2. Cecile S. Rousseaux, Watson W. Gregg. Recent decadal trends in global phytoplankton composition // Journal of Global Biogeochemical Cycles. 2015. Vol. 29, No. 10. Pp. 1674-1688.
3. Камалов С.М., Ли К.А.. География размещения месторождений природных ископаемых Уральской области и их народнохозяйственное значение. Уральск: Диалог, 1992. 156 с.
4. Смирнов П.В., Жакипбаев Б.Е., Староселец Д.А. [и др.]. Диатомиты и опоки месторождений Западного Казахстана: литология, структурно-текстурные параметры, потенциал использования // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 7. С. 187-201. DOI 10.18799/24131830/2023/7/4046.
5. Баранова М.Н., Коренькова С.Ф., Чумаченко Н.Г. История освоения кремнистых пород // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 1-4.
6. Падалкин Н.В., Евшин П.Н. Модифицированные сорбенты на основе опоки для очистки вод // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 1-3. С. 262-269. DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.262-269.

7. Петров В.П., Макридин Н.И., Соколова Ю.А., Ярмаковский В.Н. Технология и материаловедение пористых заполнителей и легких бетонов // Москва: Палеотип, 2013.332 с.
8. Петров В.П., Макридин Н.И., Ярмаковский В.Н. Пористые заполнители и легкие бетоны. Материаловедение. Технология производства // Самара: Самарский ГАСУ, 2009. 436 с.
9. Mizuriaev S. A., Montaev S. A., Taskaliev A. T. Artificial broken stone production for industrial and civil engineering: Technological Parameters // Procedia Engineering. Elsevier Ltd. 2015. Vol. 111, Pp. 534-539. DOI 10.1016/j.proeng.2015.07.037
10. Тяпкин В.А., Калашников В.И., Ерофеева И.В. Получение термолита из опочного гравия и бетона на его основе (Часть 1) // Современные научные исследования и инновации. 2015. №4 (48). [Электронный ресурс]. URL: <https://web.s nauka.ru/issues/2015/04/51697> (дата обращения 30.12.2024).
11. Шитова Т.И. Нетканый геотекстиль для дорожного строительства // Сборник научных трудов по итогам Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора В.Е. Зотикова, Часть 3. М.: ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина», 2022. С. 142-147.
12. Пичугин Д.А. Геотекстильные материалы в дорожном строительстве // Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире: Сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции, Часть 3. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. С. 48–53.
13. Комбаров В.А., Обухов П.Д., Чербаева Ж.П. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы X-й Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию Института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. С. 60-64.
14. Бартош С.А. Дорожное строительство: проблемы строительства и пути их решения // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности: Сборник материалов XXIV Международной научно-практической конференции. М., 2024. С. 208-210.
15. Стородубцева Т.Н., Шакирова О.И., Болгов А.В. Актуальность проблемы строительства дорожных покрытий, износа и повреждений верхнего слоя дорожной одежды // Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. С. 119-124.
16. Русских К.Ю., Ульрих С.А., Каширский Д.Ю. Современные технологии в дорожном строительстве // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. С. 50-55.
17. Ремнев В.В. Применение новых технологий и материалов в дорожном и аэродромном строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2020. №5-6 (256-257). С. 47–55.
18. Филатова А.В., Коробов Н.А. Инновационные методы дорожного строительства // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 79-й всероссийской научно-технической конференции. Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. С. 281-289.
19. Щербаков Б.П., Стачук А.А. Инновационные технологии в дорожном строительстве и ремонте // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева. 2021. № 2(26). С. 133-139.
20. Монтаева А.С., Щучкин С.В., Монтаев С.А., Таскалиев А.Т. [и др.]. Исследование свойств стеновой керамики с использованием опоки // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 41-42.
21. Джармухамбетов К.Г., Монтаева А.С., Монтаев С.А., Таскалиев А.Т. Разработка технологии микропористого гранулированного теплоизоляционного материала // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 30-31. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/viewid=33679> (дата обращения: 01.01.2025).
22. Shakeshev B.T., Narikov K.A., Taskaliev A.T. [et al.]. Prospects of creating the technology of composite adsorbent for water purification based on the composition of siliceous and clay rocks of Kazakhstan // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, No. 1. Pp. 805-813.

REFERENCES

1. Zdorik T.B., Fel'dman L.G., Timofeev I.N., Matias V.V. Mineraly i gornye porody SSSR [Minerals and rocks of the USSR]. Moscow: Mysl', 1970. 488 p. (rus).
2. Cecile S. Rousseaux, Watson W. Gregg. Recent decadal trends in global phytoplankton composition // Journal of Global Biogeochemical Cycles. 2015. Vol. 29, No. 10. Pp. 1674-1688.
3. Kamalov S.M., Li K.A.. Geografiya razmeshcheniya mestorozhdeniy prirodnnykh iskopayemykh Ural'skoy oblasti i ikh narodnokhozyaystvennoye znacheniye [Geography of the deposits of natural resources of the Ural region and their national economic importance]. Uralsk: Dialog, 1992. 156 p. (rus).
4. Smirnov P.V., Zhakipbaev B.E., Staroselec D.A. [i dr.]. Diatomity i opoki mestorozhdenij Zapadnogo Kazahstana: litologiya, strukturno-teksturnye parametry, potencial ispol'zovaniya [Diatomites and flanks of deposits in Western Kazakhstan: lithology, structural and textural parameters, potential use] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. T. 334, No. 7. Pp. 187-201. DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4046. (rus).

5. Baranova M.N., Koren'kova S.F., Chumachenko N.G. Istorya osvoeniya kremnistyh porod [The history of the development of siliceous rocks] // Stroitel'nye materialy. 2011. No. 8. Pp. 1-4. (rus).
6. Padalkin N.V., Evshin P.N. Modificirovannye sorbenty na osnove opoki dlya ochistki vod [Modified sorbents based on flask for water purification] // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2019. T. 10, No 1-3. Pp. 262-269. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.262-269. (rus).
7. Petrov V.P., Makridin N.I., Sokolova Yu.A., Yarmakovskij V.N. Tekhnologiya i materialovedenie poristykh zapolnitelej i legkih betonov [Technology and materials science of porous aggregates and light concretes] // Moscow: Paleotip, 2013. 332 p. (rus).
8. Petrov V.P., Makridin N.I., Yarmakovskij V.N. Poristye zapolniteli i legkie betony. Materialovedenie. Tekhnologiya proizvodstva [Porous aggregates and lightweight concretes. Materials science. Production technology] // Samara: Samarskij GASU, 2009. 436 p. (rus).
9. Mizuriaev S.A., Montaev S.A., Taskaliev A.T. Artificial broken stone production for industrial and civil engineering: Technological Parameters // Procedia Engineering. Elsevier Ltd. 2015. Vol. 111, Pp. 534-539. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.037.
10. Tyapkin V.A., Kalashnikov V.I., Erofeeva I.V. Poluchenie termolita iz odochchnogo graviya i betona na ego osnove (Chast' 1) [Obtaining thermolith from support gravel and concrete based on it (Part 1)] // Sovremennyya nauchnye issledovaniya i innovacii. 2015. No 4 (48). [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/04/51697> (date of application: 30.12.2024). (rus).
11. Shitova T.I. Netkanyj geotekstil' dlya dorozhnogo stroitel'stva [Nonwoven geotextiles for road construction] // Sbornik nauchnyh trudov po itogam Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 135-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.E. Zotikova, Chast' 3. Moscow: FGBOU VO «Rossijskij gosudarstvennyj universitet imeni A.N. Kosygina, 2022. Pp. 142-147. (rus).
12. Pichugin D.A. Geotekstil'nye materialy v dorozhnom stroitel'stve [Geotextile materials in road construction] // Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: Sbornik nauchnyh statej po materialam II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Chast' 3. Ufa: Obshchestvo s ogranicennoj otvetstvennost'yu «Nauchno-izdatel'skij centr «Vestnik nauki», 2023. Pp. 48-53. (rus).
13. Kombarov V. A., Obuhov P.D., Cherbaeva Zh.P. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve [Application of geosynthetic materials in road construction] // Ustoichivoe razvitiye regiona: arhitektura, stroitel'stvo, transport: Materialy X-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 45-letiyu Instituta arhitektury, stroitel'stva i transporta Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tambov: Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2024. Pp. 60-64. (rus).
14. Bartosh S.A. Dorozhnoe stroitel'stvo: problemy stroitel'stva i puti ih resheniya [Road construction: construction problems and ways to solve them] // Vyzovy sovremennosti i strategii razvitiya obshchestva v usloviiyah novoj real'nosti: Sbornik materialov XXIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Moscow, 2024. Pp. 208-210. (rus).
15. Storodubceva T.N., Shakirova O.I., Bolgov A.V. Aktual'nost' problemy stroitel'stva dorozhnyh pokrytij, iznosa i povrezhdenij verhnego sloya dorozhnoj odezhdy [The relevance of the problem of road surface construction, wear and damage to the upper layer of the road surface] // Sbornik statej Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyj centr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka», 2023. Pp. 119-124. (rus).
16. Russkikh K.Yu., Ul'rih S.A., Kashirskij D.Yu. Sovremennye tekhnologii v dorozhnom stroitel'stve [Modern technologies in road construction] // Organizaciya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya: materialy HIV Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Tyumen: Tyumenskij industrial'nyj universitet, 2021. Pp. 50-55. (rus).
17. Remnev V.V. Primenerie novyh tekhnologij i materialov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve [Application of new technologies and materials in road and airfield construction] // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2020. No 5-6 (256-257). Pp. 47-55. (rus).
18. Filatova A.V., Korobov N.A. Innovacionnye metody dorozhnogo stroitel'stva [Innovative methods of road construction] // Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii: Sbornik statej 79-j vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. Pp. 281-289. (rus).
19. Shcherbakov B.P., Stachuk A.A. Innovacionnye tekhnologii v dorozhnom stroitel'stve i remonte [Innovative technologies in road construction and repair] // Vestnik Voennoj akademii material'no-tehnicheskogo obespecheniya im. generala armii A.V. Hruleva. 2021. No 2 (26). Pp. 133-139. (rus).
20. Montaeva A.S., Shchuchkin S.V., Montaev S.A., Taskaliev A.T. [i dr.]. Issledovanie svojstv stenovoj keramiki s ispol'zovaniem opoki [Investigation of the properties of wall ceramics using flask] // Uspekhi sovremennoj estestvoznaniya. 2012. No 6. Pp. 41-42. (rus).
21. Dzharmuhambetov K.G., Montaeva A.S., Montaev S.A., Taskaliev A.T. Razrabotka tekhnologii mikroporistogo granulirovannogo teploizolyacionnogo materiala [Technology development of microporous granular thermal insulation material] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. No 5-1. Pp. 30-31. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/viewid=33679> (date of application: 01.01.2025). (rus).
22. Shakeshev B.T., Narikov K.A., Taskaliev A.T. [et al.]. Prospects of creating the technology of composite adsorbent for water purification based on the composition of siliceous and clay rocks of Kazakhstan // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, No. 1. Pp. 805-813.

Информация об авторах:

Ельчищева Татьяна Федоровна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Архитектура и градостроительство».
E-mail: elschevat@mail.ru

Монастырев Павел Владиславович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент, директор института архитектуры, строительства
и транспорта.
E-mail: monastyrev68@mail.ru

Езерский Валерий Александрович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство».
E-mail: wiz75micz@rambler.ru

Таскалиев Азамат Тюлепкалиевич

ЧВПОУ «Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет», г. Уральск, Республика
Казахстан, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Архитектура и строительство».
E-mail: Taskalievazamat@mail.ru

Information about authors:

Elchishcheva Tatyana F.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architecture and Urban Planning.
E-mail: elschevat@mail.ru

Monastyrev Pavel V.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
Corresponding Member of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of
Architecture, Construction and Transport.
E-mail: monastyrev68@mail.ru

Yezerskiy Valery A.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Architecture and Urban Planning".
E-mail: wiz75micz@rambler.ru

Taskaliyev Azamat T.

West Kazakhstan Innovation and Technology University, Uralsk, Republic of Kazakhstan, Master of Technical Sciences,
Senior Lecturer of the Department of "Architecture and Construction".
E-mail: Taskalievazamat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.10.2025

Одобрена после рецензирования 23.11.2025

Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 30.10.2025

Approved after reviewing 23.11.2025

Accepted for publication 01.12.2025

**В.Т. ЕРОФЕЕВ¹, М.А. ГОНЧАРОВА², О.В. ТАРАКАНОВ³, Д.А. СВЕТЛОВ⁴, И.Н.
МАКСИМОВА³, И.В. ЕРОФЕЕВА¹, В.Н. КУЧИН⁵, Д.В. СВЕТЛОВ⁶**

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва,
Россия

² Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

³ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза, Россия

⁴ ООО «Софт Протектор», г. Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

⁶ Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БИОЦИДНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. В процессе эксплуатации зданий и сооружений железобетонные конструкции подвержены воздействию различных нагрузок, которые вызывают деформации и разрушения. Прочностные и упруго-пластические свойства современных бетонов регулируются с помощью введения в составы пластификаторов, нанодобавок и наполнителей. Повышение биостойкости композитов достигается за счет введения биоцидных добавок. Статья посвящена изучению процессов деформирования и разрушения модифицированных биоцидной добавкой цементных композиций для создания долговечных порошково-активированных бетонов – одного из разновидностей бетонов нового поколения. Экспериментально доказана перспективность применения в качестве функций добавки препарата на основе соединений гуанидина. Основные характеристики процессов деформации бетонов устанавливаются с помощью диаграмм «напряжение–деформация». Получены полные диаграммы деформирования биоцидных бетонов с протяженным участком нагружения при постоянной затухающей скорости деформирования, с фиксацией плавного снижения напряжения. Диаграмма деформирования бетона на нисходящей ветви фиксируется предельной деформативностью, соответствующей достижению бетоном максимального значения прочности, и конечной точкой нисходящей ветви, соответствующей остаточной прочности бетона. Изучены зависимости влияния В/Ц-отношения и биоцидной добавки на основные параметрические точки диаграммы σ–ε. Выполнен анализ полученных диаграмм. Показано, что за счет введения биоцидной добавки повышаются прочностные показатели цементного камня. Прочность на тесте нормальной густоты возросла в пределах от 12 до 65 % (в зависимости от состава). При повышении водоцементного отношения эти изменения более значительны – 29–79 %. Повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 для составов на биоцидной добавке приводит к снижению прочности цементного камня на 27–39 %.

Ключевые слова: цементные композиции, реакционно-порошковые бетоны, биоцидная добавка, физико-механические характеристики композитов, диаграммы деформирования с нисходящей ветвью, закономерности деформирования цементных матриц реакционно-порошковых бетонов с биоцидными добавками.

**V.T. EROFEEV¹, M.A. GONCHAROVA², O.V. TARAKANOV³, D.A. SVETLOV⁴, I.N.
MAKSIMOVA³, I.V. EROFEEVA¹, V.N. KUCHIN⁵, D.V. SVETLOV⁶**

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

² Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

³ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

⁴ Soft Protector LLC, Saint Petersburg, Russia

⁵ Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

⁶ Saint Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Saint Petersburg, Russia

©Ерофеев В.Т., Гончарова М.А., Тараканов О.В., Светлов Д.А., Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Кучин В.Н.,
Светлов Д.В., 2025

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BIOCIDAL CEMENT COMPOSITES

Abstract. During the operation of buildings and structures, reinforced concrete structures are exposed to various loads that cause deformation and failure. The strength and elastic-plastic properties of modern concrete are controlled by introducing plasticizers, nanoadditives, and fillers. The biostability of composites is enhanced by adding biocidal additives. This article examines the deformation and failure of cement compositions modified with biocidal additives to create durable powder-activated concrete—a type of next-generation concrete. The potential of using guanidine-based compounds as a fungicide additive has been experimentally demonstrated. The key characteristics of concrete deformation processes are determined using stress-strain diagrams. Complete stress-strain diagrams for biocidal concrete are obtained and analyzed, showing a descending branch with an extended section of concrete loading at a constant, decaying strain rate, with a smooth decrease in stress. The concrete deformation diagram on the descending branch is fixed by the ultimate deformation, corresponding to the concrete achieving the maximum strength value, and the end point of the descending branch, corresponding to the residual strength of concrete. The dependences of the influence of the water/cement ratio and the biocidal additive on the main parametric points of the σ - ε diagram are studied. The obtained diagrams are analyzed. It is shown that the introduction of the biocidal additive increases the strength properties of the cement stone. Moreover, the role of the water-cement ratio is revealed: the strength of concrete on a test of normal consistency increased within the range of 12 to 65% (depending on the composition), with an increase in the water-cement ratio these changes are more significant – 29–79%. An increase in the water-cement ratio from 0.267 to 0.350 for compositions with a biocidal additive lead to a decrease in the strength of the cement stone by 27–39%

Keywords: cement compositions, reaction powder concretes, biocidal additive, physico-mechanical characteristics of composites, diagrams of deformation with a descending branch, patterns of deformation of cement matrices of reaction powder concretes with biocidal additives.

1. Введение

Современные бетоны – неоднородные, многофазные, гетерогенные искусственные композиционные материалы сложного иерархического строения [1]. В общей структуре бетонов выделяютnano-, субмикро-, микро-, мезо- и макроструктуры [2 - 4]. При этом вне зависимости от масштабного уровня композит состоит из двух обобщенных компонентов – матрицы и наполнителя, т.е. структура бетонов представляется капиллярно-пористой деформируемой матрицей, в которую включены более крупные зерна наполнителя (заполнителя) пико-, нано-, микро- и макромасштабного уровня.

Наноструктура описывается на уровне 10–6 мм (10–3 мкм). В цементных композитах в качестве наночастиц используется, например, ультрадисперсный микрокремнезем, а в качестве наполнителя – более грубодисперсная, нежели микрокремнезем, зола уноса и др. [5–7]. Пластифицирующими добавками являются вещества различной природы [8]. При рациональной дозировке и правильному сочетанию их с сырьевыми компонентами можно получить синергетический эффект, выражющийся в снижении водосодержания и соответственно уменьшению количества образующегося гидрооксида кальция, улучшении микропластических свойств кристаллитной структуры, уменьшении размеров составляющих цементного геля и более равномерного распределения их в микрообъемах и др. [9, 10]. Таким образом, повышается вязкость разрушения, трещиностойкость и прочность материала в целом. При этом важно учитывать, что для поддержания уровня прочности цементного камня со сформировавшейся и продолжающей развиваться структурой, важнейшим фактором обеспечения стабильности свойств является возможность и способность цементной системы к самозалечиванию (зарастанию трещин в бетоне кристаллами $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 , сопровождающееся частичным или полным восстановлением конструкции) [11].

Формирование оптимальной структуры цементного камня является задачей, которую в последние годы решают исследователи, разрабатывая композиционные вяжущие, включающие в своем составе, наряду с цементом, микронаполнители различных размеров, пластифицирующие и другие добавки [12].

С экологической точки зрения эффективно использование альтернативных минеральных добавок, таких как фосфорный шлак, стеклянный порошок и известняк [12, 13]. Использование вышеуказанных наполнителей оказывает минимальное воздействие на окружающую среду и способствует уменьшению углеродного следа. В литературе также показаны возможные пути снижения содержания дорогостоящего ультрадисперсного микрокремнезема за счет применения кварцевого порошка, порошка диоксида кремния, золы рисовой шелухи [14].

Структура и свойства цементных композитов на различных структурных уровнях формируются при введении пущолановых добавок [5], наночастиц [6], модифицирующих водорастворимых полимеров [7, 8], пластификаторов [9, 10, 11], наполнителей различных видов [7, 8], дисперсной арматуры [55].

Механические свойства и долговечность бетона во многом зависят от интенсивности связи между заполнителем и матрицей, где могут возникнуть микротрешины, которые затем распространяются на саму матрицу [14-22]. Большое влияние на свойства бетонов оказывают наноструктура, субмикро- и микроструктура. До недавнего времени эти уровни рассматривались исследователями в одном масштабном диапазоне, а именно, микроструктуры в работах [3 – 5]. Цементный камень и заполнитель демонстрируют хрупкое поведение. Напротив, бетон обладает способностью к псевдопластическим деформациям, что может быть объяснено развитием трещин в межфазной зоне.

Одним из наиболее важных факторов, улучшающих структуру бетонов, – это устранение крупных заполнителей и замена их мелким заполнителем, что способствует увеличению прочности связи компонентов внутри структуры бетона, снижению величин концентрации напряжений. В результате снижается общая неоднородность бетона [22, 23], уменьшаются механические эффекты неоднородности микроструктуры, минимизирующие внутренние дефекты материала, такие как поровое пространство и микротрешины [14-27]. Наиболее ярко эти эффекты проявляются в реакционно-порошковых бетонах (RPC). Низкая величина водоцементного отношения и добавление более мелких частиц в RPC способствует значительному снижению пористости [23, 28].

Оптимальная кривая распределения зерен по размерам будет способствовать получению материалов с наиболее благоприятной упаковкой [29].

Порошково-активированные бетоны характеризуются сверхвысокими характеристиками при воздействии статических и динамических нагрузок. Их особенностью является применение при изготовлении бинарных наполнителей, например, реологических и реакционных. В последние годы расширялись и продолжают расширяться области применения порошковых бетонов: для изготовления железобетонных колонн [31]; полноразмерных армированных балок [32]; защитных слоев сооружений с повышенной пулепропробиваемостью [33]; инженерных конструкций, подвергаемых растягиваемым нагрузкам [34, 35]; усиленных свай фундаментов [36]; низкочастотно циклически погружаемых соединений балок с колоннами [37]; сталебетонных композитных мостов и настилов [38-42]; фибробетонов в условиях воздействия повышенных температур [43, 44]; предварительно-напряженных железобетонных конструкций [45, 46]; конструкций, работающих на срез [47-49]; композитов с повышенной химико-биологической стойкостью [50]; Т-образных армированных балок малой высоты для мостовых сооружений [51-80].

Свойства порошково-активированных бетонов для ответственных конструкций улучшаются за счет введения дисперсной арматуры [30]. Для этого используются металлические, стеклянные, полипропиленовые и другие волокна. По форме они могут быть гладкие, крючковатые, гантельные и скрученные.

Расчет бетонных и железобетонных элементов во многом зависит от вводимых в него параметров, соответствующих реальному поведению бетона под нагрузкой. Одна из основных зависимостей диаграмма деформирования бетона, которая входит в нормативные документы

многих стран мира [55]. С помощью диаграмм «напряжение-деформация» ($\sigma-\varepsilon$) отслеживаются основные характеристики процессов деформирования и разрушения цементных композитов. Характер изменения диаграммы деформирования бетона зависит от множества факторов [56]: приизменной прочности, модуля упругости, предельной относительной деформации.

Приизменная прочность является одним из важнейших свойств бетона, она характеризует способность бетона сопротивляться осевым нагрузкам. Приизменная прочность очень важна для проектирования и расчетов, определения качества готовой конструкции и способности конструкции выдерживать возложенные нагрузки. Некоторые особенности изменения диаграммы « $s-e$ » в зависимости от приизменной прочности и уровня нагружения бетонов представлены в работе [90]. Эти данные позволяют проиллюстрировать характер изменения диаграммы деформирования бетонов от приизменной прочности (рис. 1). Как показывают экспериментальные исследования, с ростом приизменной прочности возрастает линейность деформирования.

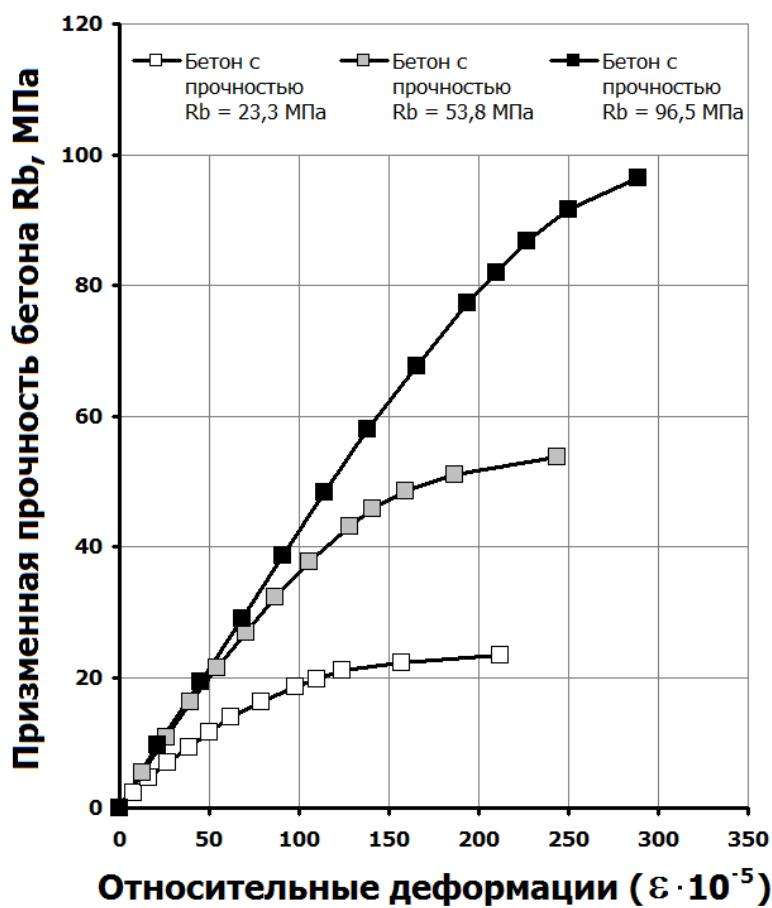


Рисунок 1 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от приизменной прочности [90]

Модуль упругости – коэффициент пропорциональности между величиной напряжения и соответствующей этому напряжению величиной упругой деформации материала. В условиях осевого сжатия или растяжения определяют модуль продольной упругости E . Исследованию зависимости начального модуля упругости бетона от класса бетона по прочности на сжатие посвящена работа [90]. Характер изменения диаграммы деформирования бетона от модуля упругости представлен на рис. 2. При построении диаграмм использовались экспериментальные данные из работы [91].

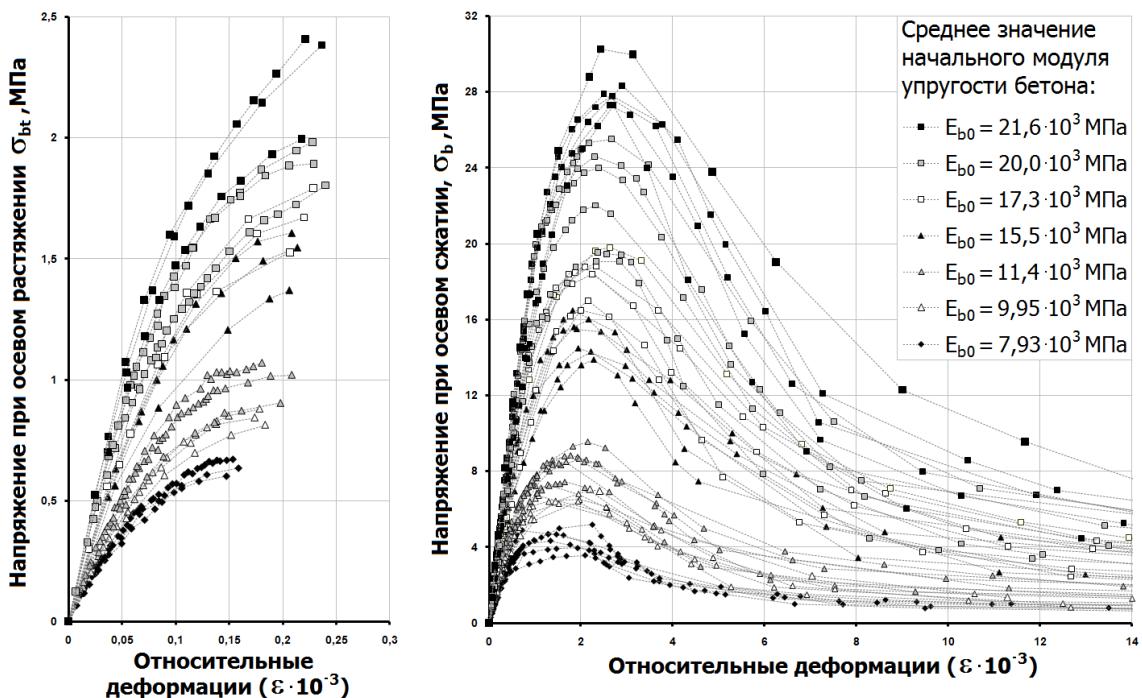


Рисунок 2 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от продольного модуля упругости

Также важной характеристикой материала, которая определяет характер диаграммы деформирования, является относительная деформация, соответствующая пределу кратковременной прочности бетона. Данные, представленные в статье [91], позволили оценить зависимость временной прочности бетона от предельных относительных деформаций бетона при осевом растяжении и сжатии.

Общий вид и основные параметрические точки диаграммы деформирования $\sigma - \epsilon$ бетона при сжатии приведены на рис. 3.

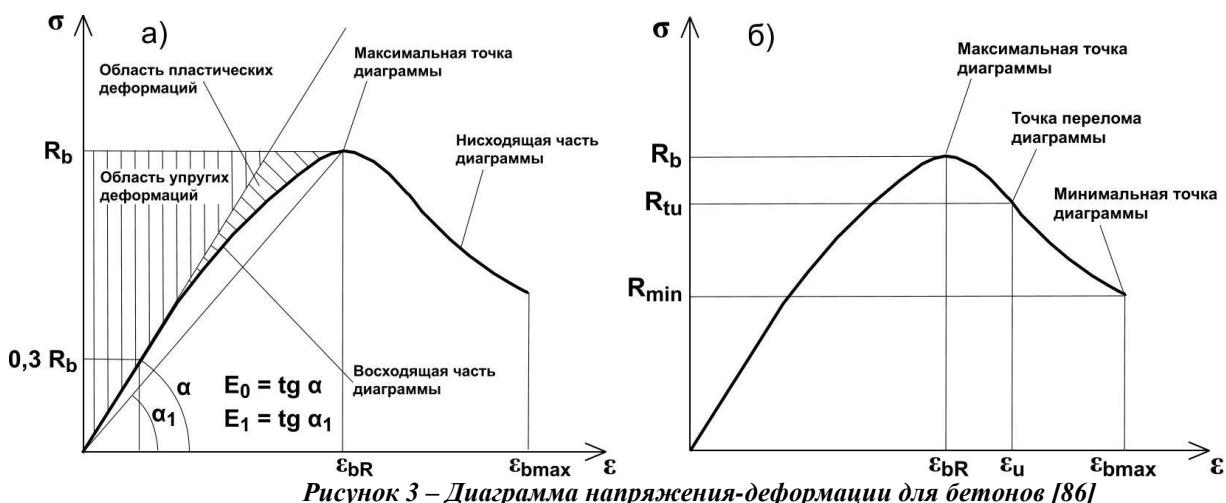


Рисунок 3 – Диаграмма напряжения-деформации для бетонов [86]

На диаграмме $\sigma - \epsilon$ выделяются три области развития деформации: линейная – на восходящей ветви – характеризует упругие деформации (сопровождаются уплотнением бетона); упруго-пластическая – нелинейный участок восходящей ветви – характеризует необратимые пластические деформации (сопровождаются разуплотнением бетона); пластическая стадия – нисходящая ветвь деформирования – характеризует пластические деформации, ведущие к разрушению бетона. Таким образом, упругие или линейные

деформации в сумме с длительными деформациями, включающими обратимые - подчиняющиеся принципу суперпозиции, и необратимые, нелинейно зависящие от напряжений, дают представление о полных деформациях цементного композита [57-59].

Характер изменения диаграммы деформирования бетона от относительных деформаций, соответствующих пределу кратковременной прочности бетона, проиллюстрирован на рисунке 4.

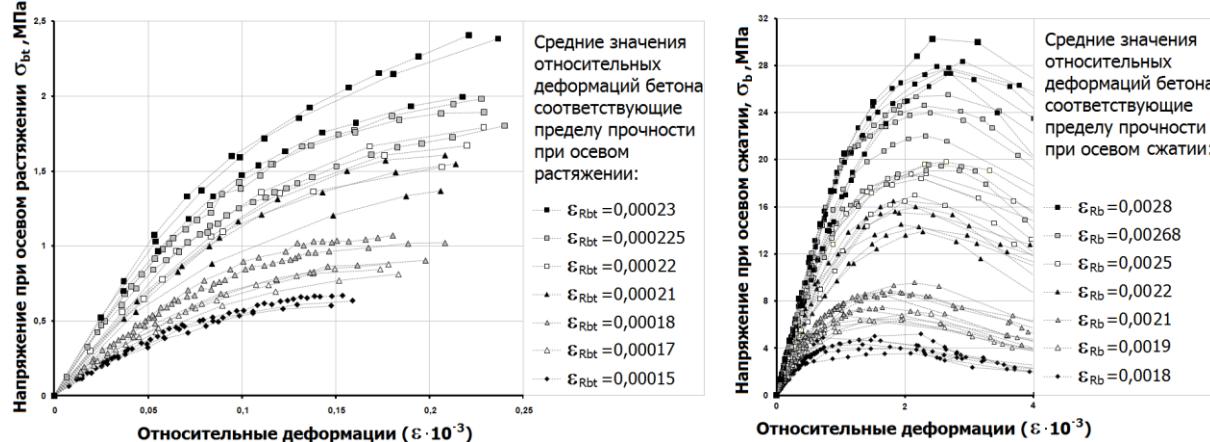


Рисунок 4 – Характер изменения диаграммы деформирования бетона от относительных деформаций, соответствующих пределу кратковременной прочности бетона

По данным, диаграммы напряжения-деформации показывают, что с ростом скорости деформации максимальное напряжение увеличивается. При этом по линейному закону происходит рост предельных деформаций, а по степенному закону снижается время до начала разрушения бетонов [89, 90, 91, 92, 93, 94].

Процесс разрушения бетонов является сложным и развивается постепенно. На первом этапе проявляются перенапряжения, следствием чего является развитие трещин в отдельных микрообъемах. Затем распределение напряжений способствует вовлечению в трещинообразование большего объема материала, вплоть до образования сплошного разрыва того или иного вида, который зависит от формы образца (конструкции), ее размеров и других факторов. На последнем этапе микроразрушения приобретают лавинный катастрофический характер [60-65].

При разрушении цементных композитов при испытаниях на сжатие образуются микротрещины отрыва, направленные параллельно действующему усилию. За счет этого увеличивается объем, хотя это «кажущееся» явление. Очевидно, что именно структура бетонов и характер приложенной нагрузки определяет механизм (интенсивность и продолжительность) развития микротрещин. При этом только анализ продольных и поперечных деформаций на диаграммах поведения бетона «σС–εС» бетонных образцов позволяет обнаружить процесс развития микроразрушений.

Актуальными являются исследования, направленные на установление аналитических выражений, максимально отражающих физическую нелинейность поведения бетонов при нагружении [66]. В этом случае физическая нелинейность в большей степени связывается с трещинами и их развитием. Деформативные свойства бетона с учетом нисходящей ветви деформации изучали в ряде работ [67 и др.].

Диаграмма деформирования бетона на нисходящей ветви фиксируется следующими параметрическими точками: ε_{bR} (предельная деформативность бетона соответствует достижению бетоном максимального значения прочности R_b), ε_{bi}, ε_{bmax} (текущая и конечная точки ниспадающей ветви диаграммы). Конечная точка соответствует остаточной прочности бетона (R_{min}). Диаграммой оцениваются различные состояния бетона как до образования трещин, так и после их возникновения.

Представляет значительный интерес установление влияния средовых нагрузок на долговечность материалов. Установлено, что в настоящее время более 50 % общего объема

регистрируемых в мире повреждений связано с деятельностью микроорганизмов [75, 76]. Биоповреждениям подвержены практически все материалы, в том числе полимерные, цементные растворы и бетоны, древесина [76-78].

Особенно остро эта проблема стоит для сооружений гидротехнического строительства, агропромышленных комплексов, предприятий пищевой промышленности, (в том числе в овощехранилищах, на кожевенных фабриках и других [69-73].

Под биоповреждениями понимают разрушение материалов и нарушение работоспособности изделий в результате воздействия биологических агентов и продуктов их жизнедеятельности [71].

Очевидно, что исследования, посвященные влиянию биоцидных препаратов на деформативные свойства цементного камня порошково-активированных бетонов, являются крайне актуальными, так как в последние годы наметилась тенденция увеличения видов и численности микроорганизмов. Возросла агрессивность известных видов. При нынешней эпидемиологической и экологической ситуации биозаражения строительных конструкций представляют серьезную угрозу внутригосударственным мерам по безопасности жизнедеятельности людей, защите их здоровья [84].

Один из наиболее эффективных и длительно действующих способов защиты строительных материалов и конструкций от поражений микроорганизмами — применение биоцидных соединений. В основе токсического действия биоцидных добавок лежит их способность ингибировать активность ферментов и определенные реакции метаболизма грибов, угнетать дыхание, нарушать их клеточные структуры. Фунгицид, контактируя с клеточной оболочкой гриба, проникает в клетку и вступает во взаимодействие с ее компонентами, подавляя биосинтез [89]. Особый интерес среди биоцидов представляют антимикробные препараты — производные гуанидина, характеризующиеся широким спектром действия. Гуанидин — фрагмент аминокислот и витамина Вс, содержится в яичном альбумине, стрептомицине и многих белках, входит в состав гуано. Гуанидин имеет формулу $(H_2N)_2C=NH$. Производные гуанидина проявляют наивысшую активность при наличии у заместителей 5–8 атомов углерода, причем эти свойства сохраняются при их включении в полимерные композиции.

Цель и задачи исследования.

Целью исследований являлось разработка инженерного и технологического решения по минимизации деформирования и разрушения порошково-активированных бетонов с биоцидной цементной матрицей.

Задачи исследования:

1. Составить аналитический обзор работ отечественных и зарубежных авторов в области исследования деформативности и изучения физико-механических свойств материалов на основе диаграмм «напряжение-деформация» для защиты зданий и сооружений от биоповреждений.

2. Применить модельные системы при получении порошково-активированных бетонов (RPC) следующих составов цементных матриц: «цемент - вода - биологическая добавка» (матрица первого рода); «цемент- молотый наполнитель – пластификатор – вода - биоцидная добавка» (матрица второго рода); 3) цемент, молотый наполнитель, тонкий наполнитель фракции 0,1–0,5 или 0,16–0,63 мм, пластификатор, вода, биоцидная добавка (матрица третьего рода); 4) матрица первого рода, матрица второго рода или матрица третьего рода, включающая мелкий заполнитель фракции 0,63–5,0 или 1,25–5,0 мм (матрица четвертого рода).

3. Обосновать применение в качестве биоцидной добавки в цементных композитах препаратов на основе соединений гуанидина.

4. Определить рациональную дозировку биоцидной добавки и водо-твердого отношения, при которых биостойкость и физико-механические свойства цементных композитов в составе матрицы первого рода существенно улучшаются.

5. Получить диаграммы «напряжение-деформация» для цементных композитов и описать влияние рецептурных факторов на основные параметрические точки. При этом в качестве типа исследуемых диаграмм выбрать диаграммы с нисходящей ветвью, которые позволяют изучать наряду с упругими упруго-пластические и пластические свойства.

6. Выполнить анализ полученных диаграмм для материалов цементных композитов от В/Ц отношения и биоцидной добавки.

2. Модели и методы

В качестве вяжущего использовался бездобавочный цемент производства ООО «Ульяновскцемент», удовлетворяющей требования ГОСТ 10178 –85.

В качестве биоцида применялся препарат «Тефлекс», представляющий собой модифицированный комплекс сополимеров гуанидина – «Тефлекс Дезинфицирующий» (ТУ 9392-006-23170704-2004). В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор (СП) серии «Melflux» – «Melflux 1641F» на основе поликарбоксилатных эфиров (производитель – компания Degussa Construction Polymers, SKW Trostberg, Германия).

Характеристики пластификатора приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Характеристики пластификатора «Melflux 1641F»

Характеристики	Melflux 1641F
Внешний вид, цвет	Порошок, цвет от желтоватого до коричневого
Потери при высушивании, % по массе	max 2,0
Насыпная плотность, кг/м ³	400–600
Реакция – pH 20% раствора t =20 °C	6,5–8,5
Рекомендуемая дозировка по отношению к массе связующего, %	0,05–1,0

В качестве реакционно-химической пущолановой добавки использовали порошкообразный липецкий микрокремнезем (марки МК-85), с удельной поверхностью 6500 м²/кг. В качестве активного дисперсного наполнителя использовалась каменная мука в виде микрокварца, характеристики которого представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Характеристики микрокварца

Размеры сит, мм	Остатки на ситах, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Модуль крупности
5	0	0	0	
2,5	0	0	0	
1,25	0	0	0	
0,63	5	0,25	0,25	
0,315	205	10,25	10,5	1,02
0,16	1620	81,0	91,5	
менее 0,16	155	7,75	102	

Песок Смольненского карьера Ичалковского района Республики Мордовия и Храмцовского карьера Ивановской области выполняли роль тонкодисперсного наполнителя мелкого заполнителя. Их свойства приведены в табл. 3-6.

Таблица 3 - Характеристики песка Ичалковского карьера Республики Мордовия

№ п/п	Свойство	Ед. изм.	Показатель
1	Класс песка	—	1
2	Модуль крупности	—	1,7
3	Объемно-насыпная масса	г/см ³	1,35
4	Содержание пылеватых и глинистых частиц	%	2,0
5	Содержание глины в комках	%	0,2
6	Коэффициент фильтрации	м/сут	3

Таблица 4 - Характеристики песка Храмцовского карьера Ивановской области

№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ 8736-93	Фактические показатели
1	Модуль крупности	2,5–3,0	2,76
2	Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	Не более 2,0	1,0
3	Содержание глины в комках, %	Не более 0,25	Отсутствует
4	Насыпная плотность, кг/м ³		1 580
5	Содержание вредных компонентов и примесей: SO ₃ , % аморфные разновидности SiO ₂ , ммоль/л	0–1,0 0–50	0,37 28,83
6	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов песка, Бк/кг	До 370–1-й кл.	39

Таблица 5 - Гранулометрический состав кварцевого песка Ичалковского карьера Республики Мордовия

Остатки	Остатки на ситах, %, с размером отверстий, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	поддон
Частные	0,28	1,11	6,44	32,16	47,34	12,67
Полные	0,28	1,39	7,83	39,99	87,33	100

Таблица 6 - Характеристика зернового состава кварцевого песка Храмцовского карьера Ивановской области

Остатки	Остатки на ситах, %, с размером отверстий, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	поддон
Частные	9,63	8,89	34,35	35,37	9,94	1,82
Полные	9,63	18,52	52,87	88,24	98,18	100

В качестве дисперсной арматуры применяли полипропиленовое волокно длиной 18 мм и диаметром 20 мкм, ТУ 2272-001-90345062 2012, ТУ 5458-001-82255741-2008, стальную фибра длиной 12 мм и диаметром 0,22 мм.

Образцы изготавливались в металлических формах, которые предварительно смазывали парафином. Твердение образцов проходило при термовлажностной обработке, после того как в течение одних суток они твердели в формах в ванной с гидравлическим затвором. Влияние биоцидной добавки «Тефлекс Дезинфикант» при различном содержании воды исследовали на составах, приведенных в табл. 7.

Таблица 7 - Составы композиций для изготовления образцов

Компоненты	Содержание, мас. ч. в составах			
	1	2	T17	T18
Цемент ульяновский ПЦ 500 Д0	1	1	1	1
Вода	0,267	0,350	0,267	0,350
Биоцидная добавка	–	–	0,030	0,030

Исследование свойств фибробетона проводили на составах при различном соотношении компонентов (табл. 8).

Таблица 8 - Составы фибробетонов

Наименование	Содержание компонентов в составе, масс %						
	Рациональные составы						Прототип
	1	2	3	4	5	6	
Портландцемент	32,1	31,0	30,1	29,0	27,9	26,9	20,3
Микрокремнезем	4,74	4,62	4,50	4,28	4,26	4,14	2,3
Пластификатор	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,18
Микрокварц, $S_{уд}=400\text{м}^2/\text{г}$	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	-
Стальная фибра	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	
Полипропиленовое волокно	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,05
Кварцевый песок фракции 0,16-0,63 мм	24,1	24,7	25,1	25,9	26,4	26,9	-
Кварцевый песок фракции 1,25-5 мм	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,3	-
Песок нефракционированный крупный $M_k=2,5 \div 3,0$	-	-	-	-	-	-	67,6
Стеарат полигексаметиленгуанидин	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	-
Вода	8,9	8,8	8,7	8,6	8,5	8,4	9,57

Прочность определяли при испытании образцов в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы испытывали на изгиб как балку на двух опорах одиночной силой, приложенной в середине пролета. Прочность при сжатии определяли на половинках образцов-балочек, имеющих площадь поперечного сечения 1,4 и 25 см², с помощью специально изготовленного приспособления, обеспечивающего приложение нагрузки через нажимные пластинки. Для проведения исследований по определению прочности образцов на раскалывание использовалась оснастка, обеспечивающая их фиксацию в заданном положении и нагружение их граней призмами, расположенными на верхней и нижней плите нагружающего устройства. Средняя скорость нарастания нагрузки принималась равной 50 Н/с.

Испытание фибробетонных образцов на прочность при сжатии, морозостойкость, водонепроницаемость и биостойкость производилось на 28-е сутки в соответствии с ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10060 2012, ГОСТ 12730.5-84.

Биостойкость цементных композиций определяли в соответствии с ГОСТ 9.048.

Экспериментальную диаграмму трансформировали в расчетную по требованиям ГОСТ 29167. С этой целью, пользуясь средствами графического редактора AutoCAD, по набору данных восстанавливали диаграмму деформирования. Для получения равновесной диаграммы «усилие – перемещение» («F – V») при испытаниях образцов была использована установка повышенной жесткости. На основании данных усилия F и перемещения V строилась диаграмма «F – V», показанная на рис. 5.

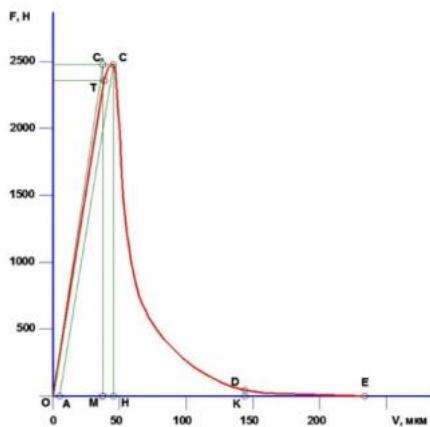


Рисунок 5 – Равновесная диаграмма деформирования образца
По результатам испытаний формировались итоговые таблицы 9-11

Таблица 9 - Определение характеристик трещиностойкости образца. Исходные данными являлись для образца № Т17.

Состав образца	Режимы отверждения	Геометрические размеры образца					Масса образца, кг	Плотность образца, кг/м ³	Влажность (весовая), %
		L·10 ³	B·10 ³	H·10 ³	A ₀ ·10 ³	L ₀ ·10 ³			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T-17	ТВО	160	40	40	4	120	0,581	2270	3,0

Примечание: L – длина образца; B – ширина; H – высота; A₀ – длина наведенной в образце трещины; L₀ – расстояние между опорами образца; ТВО – тепловлажностная обработка

Таблица 10 - Значения нагрузки F, Н, величины перемещений V, м, в характерных точках на кривой «F–V»

Показатели в характерных точках диаграммы деформирования											
C		H		T		A		D		M	
F _c ·10 ³ 3	V _c ·10 ³ 3	F _H ·10 ³ 3	V _H ·10 ³ 3	F _T ·10 ³ 3	V _T ·10 ³ 3	F _A ·10 ³ 3	V _A ·10 ³ 3	F _D ·10 ³ 3	V _D ·10 ³ 3	F _M ·10 ³ 3	V _M ·10 ³ 3
2503. 0	32.0	0.0	32.0	2385	18.8	0.0	11.8	22	219	0.0	18.2
											278.0

Таблица 11 - Расчетные характеристики материала

Энергетические показатели характеристик							Трещиностойкость		Свойства бетона		
W _e , Дж	W _m , Дж	W _i , Дж	W _{ul} , Дж	G _i , Дж	G _F , Дж	J _j , Дж	K _i , МПа ^{1/2}	R _{tbf} , МПа	E, МПа	X _{cF} , м	R _{pp} , МПа
0,02 4 8	0,02 9 39	0,19338 1	0,02279 7	37,443 8	151,50 1	21,612 3	0,93178	6,43621 8	23187,3 8	0,084 8	6,8 10,5

Примечание: W_e – энергозатраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины; W_m – то же, на процессы развития и слияния микротрещин; W_i – то же, на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины; W_{ul} – то же, на упругое деформирование сплошного образца; G_i – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины; G_F – то же, на статическое разрушение; J_j – статический джей-интеграл; K_i – статический коэффициент интенсивности напряжений; R_{tbf} – прочность бетона на растяжение при изгибе; X_{cF} – критерий, характеризующий хрупкость испытуемого материала; R_{pp} – прочность на растяжение при раскалывании, вычисляемая как среднее арифметическое двух показателей; R – то же, прочность на сжатие (величины R_{pp} и R устанавливаются проведением дополнительных испытаний).

Испытания с тест-объектами мицелиальных грибов и бактерий грибов проводили следующим образом:

Размеры образца не превышали внутренние размеры стандартной чашки Петри (диаметр 900 мм), толщина образца не превышала 0,7 глубины чашки. С учетом этого был принят размер образцов 1×1×3 см. Каждый образец очищался от загрязнений, протирался тампоном или кистью, смоченными в этиловом спирте. Затем образцы помещали в стерильные чашки Петри.

Испытание на биостойкость материала проводили по следующим микробиодеструкторам:

- а) грибы: *Aspergillus niger*; *Aspergillus terreus*; *Aspergillus versicolor*; *Alternaria alternata*; *Aurebasidium pullulans*; *Cladosporium cladosporioides*; *Cladosporium sphaerospermum*; *Mucor racemosus*; *Penicillium ochro-chloron*; *Penicillium funiculosum*; *Paecilomyces variotii*; *Scopulariopsis brevicaulis*; *Trichoderma viride*;
- б) бактерии: *Streptomyces* sp.; *Nitrosomonas* sp.; *Thiobacillus ferrooxidans*; *Thiobacillus thioparus*; *Pseudomonas fluorescens*; *Gallionella ferruginea*; *Bacillus subtilis*; *Desulfovibrio desulfuricans*.

Оценку степени биостойкости каждого образца проводили по табл. 12.

Таблица 12 - Оценка степени биостойкости образцов испытуемых материалов для каждого тест-объекта

Характеристика балла	Балл
Под микроскопом прорастания спор, конидий грибов и бактерий не обнаружено	0
Под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий. Под микроскопом видны единичные колонии бактерий	1
Под микроскопом виден развитый мицелий, возможно спороношение. Под микроскопом видны немногочисленные колонии бактерий	2
Невооруженным глазом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом. Под микроскопом видны многочисленные колонии бактерий	3
Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25% испытуемой поверхности. То же, для бактерий	4
Невооруженным глазом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих более 25% испытуемой поверхности. То же, для бактерий	5

3. Результаты исследования и их анализ

1. Испытание биоцидов в средах мицелиальных грибов и бактерий и исследование биологической стойкости цементных композитов с биоцидными добавками.

Исследования проводили в два этапа. На первом этапе для оценки влияния микрофлоры и биоцидных добавок на прочность цементного камня были изготовлены несколько серий образцов. В качестве биологических агентов использовались выделенные штаммы *Bacillus subtilis* и других типичных микроорганизмов, поражающих строительные материалы (табл. 13).

Таблица 13 - Микроорганизмы, используемые в испытаниях

Тип микроорганизма	Вид
Мицелиальные грибы	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Trichoderma viride</i>
Бактерии	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Escherichia coli</i>
Актиномицеты	<i>Streptomyces</i> spp.

Для примера в статье приводится три типа образцов: контрольный состав бетона (без добавок и заражения); бетон, инфицированный бактериальной культурой; бетон, инфицированный бактериальной культурой с добавлением «Тефлекса».

Образцы выдерживались в условиях, способствующих развитию микрофлоры (температура 28 °С, влажность 90 %). Добавка Тефлекс вводилась в количестве 0,5 % от массы цемента. Результаты испытаний представлены в табл. 14.

Таблица 14 - Результаты испытаний

Состав	Прочность, МПа
Бетон (контроль)	32,5
Бетон + микроорганизмы	18,7
Бетон + бактерии + Тефлекс	39,2

Как видно из результатов испытаний, микробиологическое заражение без дополнительной защиты приводит к значительному снижению прочности цементного композита: более чем на 42 % по сравнению с контрольным образцом. В то же время введение добавки Тефлекса не только полностью компенсировало потери, но и увеличило прочность по сравнению с исходным составом на 20 %.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале полимеров гуанидина как стабилизирующих и антисептических добавок, предотвращающих деградацию материалов на основе цементных вяжущих под действием биологических агентов. Рост прочности может быть обусловлен как снижением микробиологической активности, так и возможным участием гуанидиновой группы в гидратационных процессах. На втором этапе исследований образцы изготавливались с биоцидной присадкой в разных концентрациях

В качестве объектов испытания выступали цементные композиты с различными типами биоцидных добавок марки Тефлекс. Испытания проводились в средах мицелиальных грибов и бактерий. Для выращивания грибов применялись среды Czapek-Dox, PDA, Sabouraud, а для бактерий – Нутриентный агар и МРА. Пробы цементных композитов с Тефлекс вносились на выращенные культуры грибов и бактерий. Испытания велись в течение 28 суток при T = 25 °С. В табл. 15 представлены полученные результаты испытаний по установлению роста микроорганизмов в зависимости от типа препарата (№№ 1–4).

Таблица 15 - Результаты испытаний

Вид микробов	Разведение ПГМГ, %	Зона отсутствия роста микроорганизмов, мм			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
E. coli	1	4	3		
	0,1	1	1	3	2,5
	0,01	0,5	0,5		
	0,001	0,2	0,1		
Staphilo-coccus aureus	1	6	7		
	0,1	2	4	6	5,5
	0,01	1	2		
	0,001	0	0		
Candida	1	4	4		
	0,1	1	2	5,5	0
	0,01	0	0		
	0,001	0	0		
Aspergillus	1	4 (ингибиция)	4 (ингибиция)		
	0,1	0	0	3	4
	0,01	0	0		
	0,001	0	0		

Из результатов исследований следует, что растворы всех препаратов высокоактивных против всех тест-штаммов, в том числе бактерий, дрожжеподобных и плесневых грибов. Максимальную активность проявил препарат № 2, давший наибольшие усредненные зоны отсутствия роста вокруг дисков. Таким образом, использование биоцидных композиций на основе Тефлекса в составе цементных материалов может быть рекомендовано для условий, подверженных воздействию микроорганизмов. Это открывает перспективы применения таких добавок в подземных, транспортных, санитарных и других объектах, где важна не только прочность, но и микробиологическая стойкость строительных материалов.

2. Исследование прочности, трещиностойкости и деформативности цементного камня с биоцидной добавкой.

Влияние биоцидной добавки «Тефлекс Дезинфикант» на свойства цементного камня изучали на составах, отличающихся водоцементным отношением: образцы из цементного теста нормальной густоты с В/Ц 0,267 (состав № 1) без биоцидной добавки и состава № Т17 с биоцидной добавкой, а также образцы, изготовленные при повышенном водоцементном отношении – 0,350 (состав № 2) без биоцидной добавки и состава № Т18 с биоцидной добавкой. Результаты прочностных испытаний образцов приведены в табл. 16.

Таблица 16 - Влияние водоцементного отношения на прочность образцов цементного камня с биоцидной добавкой

Номер состава	В/Ц	Прочность на сжатие		Прочность при изгибе		Прочность на растяжение при раскалывании	
		R, МПа	%	R _{tb} , МПа	%	R _{bb} , МПа	%
T17	0,267	70,9	100	9,72	100	5,39	100
T18	0,350	51,5	73	6,58	68	3,30	61

Как следует из таблицы 16, для составов на биоцидной добавке повышение водоцементного отношения приводит к снижению прочности цементного камня аналогично бездобавочным составам (с 22 до 58 %), в то же время с повышением В/Ц от 0,267 до 0,350 снижение прочности для составов с биоцидной добавкой оказалось менее значительным и находится в пределах от 27 до 39 %. Введение биоцидной добавки приводит к повышению прочностных показателей цементного камня, причем на teste нормальной густоты это изменение составило 12–65 %, а при повышенном водоцементном отношении это изменение более значительно – 29–79 %.

3. Исследование свойств дисперсно-армированных порошково-активированных бетонов – строительных материалов нового поколения.

Для исследований были выбраны составы, приведенные выше в табл. 8. Физико-механические свойства данных составов приведены в табл. 17.

Таблица 17 - Физико-механические свойства фибробетонов

Наименование	Содержание компонентов в составе, масс %						
	Рациональные составы						Прототип
	1	2	3	4	5	6	
Прочность при изгибе, МПа	33,0	41,0	45,0	43,0	41,0	31,0	10,0
Прочность при сжатии, МПа	100,0	150,0	180,0	170,0	150,0	110,0	50,5
Ударная вязкость, кДж/м ²	3,6	3,7	3,9	4,0	3,8	3,7	2,0
Морозостойкость, циклы	650	650	700	700	750	650	F600
Водонепроницаемость, МПа*10 ⁻¹	18	18	18	18	18	18	W16
Биостойкость	Гриб. *	Фунг. **	Фунг. **	Фунг. **	Фунг.* **	Фунг. **	Не грибо- стойкий

Примечание: *Гриб – грибостойкий; **Фунг. – фунгицидный

Оптимизация расхода компонентов в составе фибробетонной смеси позволила получить фибробетоны с высокими эксплуатационными показателями качества. При применении микрокремнезема снижается расход цемента в бетонах и повышается его прочность за счет снижения пористости цементного камня. При введении же кварцевых порошков различной крупности увеличивается плотность смесей. Пластификатор позволяет увеличить водоредуцирующий эффект, улучшить реологические и технологические свойства смеси. Наибольшее влияние при равномерном распределении по объему оказывают полипропиленовое волокно и стальная фибра на бетонную матрицу, усиливающей контактную зону «цементный камень-заполнитель».

Сопоставление результатов испытаний показывает, что для оптимальных составов фибробетонов с фунгицидными свойствами характерны прочность при сжатии выше на 12 %, морозостойкость выше в 1,7 раза при экономии цемента и микрокремнезема в 1,5 раза и уменьшении расхода волокна от 10 до 30 раз по массе.

4. Заключение

1. Составлен обзор научно-технической литературы отечественных и зарубежных авторов в области исследования деформативности и расчета физико-механических свойств материалов на основе диаграмм «напряжение-деформация», биологического сопротивления и долговечности.

2. Предложено в качестве типа исследуемых диаграмм для цементных композитов выбрать диаграммы с нисходящей ветвью, которые позволяют изучать наряду с упругими упруго-пластические и пластические свойства.

3. Путем проведения физико-механических испытаний образцов из цементного камня получены диаграммы «напряжение-деформация» с нисходящей ветвью. Описано влияние рецептурных факторов (В/Ц-отношения и биоцидной добавки) на основные параметрические точки.

4. Выявлено, что повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 приводит к снижению на 22–30 % прочности на сжатие, вызывает более упругое поведение материала под нагрузкой, значительное (в 4–5 раз) удлинение ниспадающей ветви полной равновесной диаграммы деформирования цементного камня.

5. Введение биоцидной добавки приводит к повышению прочностных показателей цементного камня, причем на тесте нормальной густоты это изменение составило 12–65 %, а при повышенном водоцементном отношении это изменение более значительно – 29–79 %. Повышение водоцементного отношения с 0,267 до 0,350 для составов на биоцидной добавке приводит к снижению прочности цементного камня на 27–39 %.

6. Установлено, что биоцидные композиции на основе гуанидинсодержащих полимеров проявили высокую активность против широкого спектра микроорганизмов (бактерии, дрожжеподобные и плесневые грибы). Введение добавки Тефлекс не только полностью компенсирует потери прочности, но и повышает ее на ~20 % по сравнению с контролем. Разработанные биоцидные добавки перспективны для использования в условиях повышенного микробиологического риска: подземные сооружения, санитарные и транспортные объекты и другие постройки.

7. Полные равновесные диаграммы деформирования цементного камня с биоцидной добавкой аппроксимирована двумя прямыми и двумя параболами.

8. Показано, что повышение долговечности бетонов нового поколения достигается за счет оптимизации их рецептуры, введения полипропиленовой и стальной дисперсной арматуры, биоцидных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н. И., Круглов В. М., Соловьев Л. Ю. Нелинейное деформирование бетона и железобетона. – Новосибирск: Издательство СГУПСа, 2001. – 276 с.
2. Шейкин А. Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
3. Грушко И. М. Прочность бетонов на растяжение / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, С. Т. Ращевский. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1973. – 155 с.
4. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев и др. – Ташкент : Фан, 1991. – 342 с.
5. Iskhakov, I., Frolov, I., Ribakov, Y., 2022. Experimental verification of theoretical stress-strain model for compressed concrete considering post-peak stage // Materials 15(17), 6064.
6. Y. Feng, Y. Su, N. Lu, S. Shah, Meta concrete: exploring novel functionality of concrete using nanotechnology, Eng. Sci. (2020), <https://doi.org/10.30919/es8d816>.
7. S. Barbhuiya, B.B. Das, Water-soluble polymers in cementitious materials: a comprehensive review of roles, mechanisms and applications, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023) e02312, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02312>.
8. N. P. Tran, T. N. Nguyen, T. D. Ngo, The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: a systematic review, Constr. Build. Mater. 360 (2022) 129562, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129562>.
9. Javadi A., Jamil T., Abouzari-Lotf, E., Soucek, M. D., & Heinz, H. (2021). Working mechanisms and design principles of comb-like polycarboxylate ether superplasticizers in cement hydration: quantitative insights for a series of well-defined copolymers. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(25), 8354–8371.
10. L. Xia, M. Zhou, T. Ni, Z. Liu. Synthesis and characterization of a novel early-strength polycarboxylate superplasticizer and its performances in cementitious system, J. Appl. Polym. Sci. 137 (2020) 48906.
11. X. Liu, G. Lai, J. Guan, S. Qian, Z. Wang, S. Cui, F. Gao, Y. Jiao, R. Tao, Technical optimization and life cycle assessment of environment-friendly superplasticizer for concrete engineering, Chemosphere 281 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130955>.
12. Muthukumar, M., Mohan, D., 2004. Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments. J. Appl. Polym. Sci. 94 (3), 1107–1116.
13. Khalid M. Y, Al Rashid A, Arif Z. U, Akram N, Arshad H, Garcia Marquez FP. Characterization of failure strain in fiber reinforced Composites: under on-Axis and off-Axis loading. Crystals 2021;11:216. <https://doi.org/10.3390/cryst11020216>.
14. Dobiszewska M, Schindler AK, Pichór W. Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. Constr Build Mater 2018;177:222–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>.
15. Peng Y, Zhang J, Liu J, Ke J, Wang F. Properties and microstructure of reactive powderconcrete having ahigh content of phosphorous slag powder andsilica fume. Constr Build Mater 2015;101:482–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046>.
16. Travush V. I., Karpenko N. I., Erofeev V. T., Vatin N. I., Erofeeva I. V., Maksimova I. N., Kondrashchenko V. I., Kesarijskij A. G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer // Magazine of Civil Engineering. Volume 95, Issue 3, 2020. – P. 42–48.
17. Saran, ASA, Magudeaswaran P, Mohammed MK. Concrete Microstructure- A Review, vol. 2; 2016.
18. Elsharief A, Cohen MD, Olek J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. Cem Concr Res 2003;33:1837–49. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9).
19. Xie Ping J. J, Beaudoin R. B. Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface. Cem Concr Res 1991. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90059-Q).
20. Liao K. Y., Chang P. K., Peng Y. N., Yang C. C. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. Cem Concr Res 2004;34:977–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.019>.
21. Neville A. M. , Brooks J. J. Properties of concrete 2010. <https://doi.org/10.4135/9781412975704.n88>.
22. Erofeev V. T., Vatin N. I., Maximova I. N., Tarakanov O. V., Sanyagina Y. A., Erofeeva I. V., Suzdal'tsev O. V. Powder-activated concrete with a granular surface texture // International journal for computational civil and structural engineering. – 2022. – № 4. – Т. 18. – Р. 49–61.
23. Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. Constr Build Mater 2015;101:741–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
24. Tam C. M., Tam V. W. Y., Ng K. M. Optimal conditions for producing reactive powder concrete. Mag Concr Res 2010;62:701–16. <https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.10.701>.
25. Hassan A. M. T, Jones S. W, Mahmud G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC). Constr Build Mater 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>.
26. Chan Y. W., Chu S. H.. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. Cem Concr Res 2004;34:1167–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.

27. Kang S. T., Lee Y., Park Y. D., Kim J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.012>.
28. Ma J., Orgass M., Dehn F., Schmidt Dio, Tue N. V. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with or without coarse aggregates. *Proc Int Symp Ultra High Perform Concr* 2004:205–12.
29. Zdeb T. An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes. *Constr Build Mater* 2017;131:758–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.026>.
30. Рабинович Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны. – М. : Стройиздат, 1989. – 176 с.
31. Zhang, L., Zhang, M., Wang, K., Shi, J., Chen, W., Yan, K. Axial compressive behavior of steel-reinforced reactive powder concrete short columns (2022) *Structures*, 46, pp. 433-444.
32. Bu, L., Tang, D. Experimental Study and Numerical Analysis on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with RPC Reinforcement Mesh (2022) *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 38 (4), pp. 601-609.
33. Xu, S., Wu, P., Zhou, F., Li, Q., Zeng, T., Jiang, X. Experimental investigation and numerical prediction on resistance of reactive powder concrete to multiple penetration (2021) *Baozha Yu Chongji / Explosion and Shock Waves*, 41 (6), art. no. 063301 .
34. Guo, M., Gao, R. Relationships among the characteristic tensile strain, curing age, and strength of reactive powder concrete (2021) *Materials*, 14 (10), art. no. 2660, .
35. Jia, F., He, K., Wang, W., An, M., Lu, Z. Splitting tensile bonding strength of Reactive Powder Concrete to normal concrete (2016) *Tiedao Xuebao / Journal of the China Railway Society*, 38 (3), pp. 127-132.
36. Cheng, J., Luo, X., Zhuang, Y., Xu, L., Luo, X. Experimental study on dynamic response characteristics of RPC and RC micro piles in SAJBs (2019) *Applied Sciences (Switzerland)*, 9 (13), art. no. 2644, .
37. Ju, Y., Shen, H., Wang, D., Zheng, W. Experimental study on crack resistance of reactive powder concrete beam-column joints (2019) *ZhongnanDaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50 (5), pp. 1203-1209.
38. Cui, B., Wang, K.-K., Zhou, Q.-F., Deng, K.-L., Wei, L.-Y. Experiment on Static and Fatigue Performances of Assembled Concrete-steel Link in Assembled Composite Bridge Deck (2018) *ZhongguoGongluXuebao/China Journal of Highway and Transport*, 31 (12), pp. 106-114.
39. Zhao, C., Wang, K., Zhou, Q., Deng, K., Cui, B. Full-Scale Test and Simulation on Flexural Behavior of Dovetail-Shaped Reactive Powder-Concrete Wet Joint in a Composite Deck System (2018) *Journal of Bridge Engineering*, 23 (8), art. no. 04018051 .
40. Pan, W.-H., Fan, J.-S., Nie, J.-G., Hu, J.-H., Cui, J.-F. Experimental Study on Tensile Behavior of Wet Joints in a Prefabricated Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin Reactive-Powder Concrete Layer (2016) *Journal of Bridge Engineering*, 21 (10), art. no. 04016064 .
41. Han, L.Z., Zhang, J.Q., Nie, J.G. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2014) *Advanced Materials Research*, 900, pp. 473-482.
42. Zhang, Y., Yan, G., An, M., Zhong, T. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2009) *Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*, 33 (1), pp. 81-85.
43. Yan, R., Du, H., Xu, Y. Mechanical and thermal expansion properties of RPC with steel fibers after exposure to elevated temperatures (2018) *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*, 0.
44. Jin, L., He, P., Fu, Q., Chen, M. Relationship of macro cracks and microstructure of RPC component (2014) *Jiangsu DaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 35 (4), pp. 452-456 and 462.
45. Zhang, M., Zeng, B. Reliability-based calibration of material partial factor of prestressed reactive powder concrete members (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48, pp. 88-97.
46. Cao, X., Peng, J.-C., Jin, L.-Z. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam (2014) *Wuhan LigongDaxueXuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, 36 (1), pp. 116-122.
47. Deng, Z., Chen, C., Chen, X. Experimental research on the shear behaviors of hybrid fiber reinforced RPC beams (2015) *Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal*, 48 (5), pp. 51-60.
48. Deng, Z., Zhou, D., Cheng, S. The shear bear capacity of reactive powder concrete beam with high strength stirrup (2014) *Harbin GongchengDaxueXuebao/Journal of Harbin Engineering University*, 35 (12), pp. 1512-1518.
49. Ji, W., Zhou, C. Shear lag analysis of prestressed RPC box girder (2007) *ZhongguoTiedaoKexue/China Railway Science*, 28 (1), pp. 19-22.
50. He, F., Huang, Z.-Y., Yi, W.-J. Acid-resistance performance of reactive powder concrete (2011) *Journal of Natural Disasters*, 20 (2), pp. 44-49. 4922-21.
51. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design of simple-supported reactive powder concrete railway bridge with span of 32m (2011) *Advanced Materials Research*, 163-167, pp. 904-907.
52. Lu, S.-S., Zheng, W.-Z. Calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars (2010) *Harbin GongyeDaxueXuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, 42 (4), pp. 536-540.

53. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design and experimental study of low-height reactive powder concrete beams (2009) Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal, 42 (5), pp. 96-102.
54. Yan, Z., Ji, W., An, M. Experimental study and full-range analysis of Reactive Powder Concrete T-beams (2009) Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University, 33 (1), pp. 86-90.
55. Панфилов Д. А. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах / Д. А. Панфилов, А. А. Пищулов, К. И. Гимадетдинов. - (Техническое регулирование). - Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - № 3. - С. 80-84.
56. Безгодов И. М., Дмитренко Е. Н. Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 99-104. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104.
57. Рахманов В. А., Сафонов А. А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм деформирования бетона при сжатии // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – № 3. – С. 121–125.
58. Галустов К. З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций / К. З. Галустов. – М.: Физматлит, 2006. – 248 с.
59. Максимова И. Н. Структура и конструкционная прочность цементных композитов: монография / И. Н. Максимова, Н. И. Макридин, В. Т. Ерофеев, Ю. П. Скачков // Москва: Издательство АСВ, 2017. – 400 с.
60. Bragov A. M., Gonov M. E., Lomunov A. K., Balandin Vl. Vl. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Chapter 23 In: B. E. Abali and I. Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials, 2020, vol 130. – P. 403–412.
61. Bragov A. M., Konstantinov A. Yu., Lamzin D. A., Lomunov A.K., Gonov M.E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // Procedia Structural Integrity 28 (2020) 2174–2180.
62. Bragov A. M., Gonov M. E., Lamzin D A., Lomunov A. K., Modin I. A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics, 2021, 47(6) 962-967.
63. Gonov M., Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress // Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications. – 2021. – P. 193–211.
64. Gonov M. E., Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lomunov A. K., Filippov A. R. Features of High-Speed Deformation and Fracture of Fine-Grained Concrete Under Tensile Stress // Chapter 5. In: Altenbach H., Eremeyev V.A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modelling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. – 2022. – P. 193–211.
65. Варламов А. А., Римшин В. И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 436 с.
66. Pavluk A., Gomon S., Ziatuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. – 2023. – 65(2). – P. 109–121.
67. Бакушев С. В. Аппроксимация диаграмм деформирования билинейными функциями // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. № 2 (283). – С. 2–11.
68. Бакушев С. В. Аппроксимация диаграмм деформирования квадратичными функциями // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2020. № 3 (290). – С. 2–14.
69. Bertron A., Duchesne J. Attack of cementitious materials by organic acids in agricultural and agrofood effluents // RILEM State-of-the Art Reports. – 2013.
70. Vuppurturi S., Fathepure B. Z., Wilber G. G. and 4 more. Isolation of a sulfur oxidizing Streptomyces sp. from deteriorating bridge structures and its role in concrete deterioration // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2015.
71. Dubravka B., Marijana S., Igor C. Review of microbial corrosion of concrete // Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society. – 2010.
72. Strokova V., Nelyubova V., Rykunova M. and 1 more, Strength and structure of cement stone exposed to domestic chicken coop // Journal of Physics: Conference Series. – 2019.
73. Lapcharatsangroj L., Chalida U.-T. Trial to Determine Durability and Serviceability for Swine Farm in Thailand // MATEC Web of Conferences. – 2018.
74. Barbhuiya S., Kumala D. Behaviour of a sustainable concrete in acidic environment // Sustainability (Switzerland). – 2017.
75. Wei S., Jiang Z., Liu H. and 2 more. Microbiologically induced deterioration of concrete - A review // Brazilian Journal of Microbiology. – 2013.
76. Lanzón, M., García-Ruiz, P.A. Deterioration and damage evaluation of rendering mortars exposed to sulphuric acid // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010,
77. Wei S., Sanchez M., Trejo D. and 1 more. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2010.
78. De Belie N. Microorganisms versus stony materials: A love hate relationship // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010.

79. Yousefi A., Allahverdi A., Hejazi P. Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition // International Biodegradation and Biodegradation. – 2014.
80. George R. P., Ramya S., Ramachandran D. and 1 more. Studies on Biodegradation of normal concrete surfaces by fungus *Fusarium* sp. // Cement and Concrete Research. – 2013.
81. Soleimani S., Ormeci B., Isgor O. B. Growth and characterization of *Escherichia coli* DH5 α biofilm on concrete surfaces as a protective layer against microbiologically influenced concrete deterioration (MICD) // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2013.
82. Li H., Liu D., Lian B. and 2 more. Microbial Diversity and Community Structure on Corroding Concretes // Geomicrobiology Journal. – 2012.
83. Fiertak M., Stanaszek-Tomal E., Kozak A. The growth of fungi and their effect on the behaviour of cement polymer composites // Advances in Cement Research. – 2015.
84. Geweely N. S. I. Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over the River Nile, Egypt // Biodegradation. – 2011.
85. Биологическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов и др. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. — 193 с.
86. Pereyra A. M., Gonzalez M. R., Rodrigues T. A. and 2 more. Enhancement of biocorrosion resistance of epoxy coating by addition of Ag/Zn exchanged a zeolite // Surface and Coatings Technology. – 2015.
87. Munzer C., Belhaj E., Meylheuc T. and 2 more. Effects of bioadmixture on surface characteristics of cement pastes // Materiaux et Techniques. – 2015.
88. Vipulanandan C., Liu J. Polymer Coatings for Concrete Surfaces: Testing and Modeling // Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition. – 2012.
89. Viktoria Il'ina, Valeria Strokova, Vladimir Erofeev, Irina Stepina. Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // Architecture and Engineering Journal, Vol 9, № 3, 2024. – P. 53–62.
90. Безгодов, И.М. Совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона / И.М. Безгодов, Е.Н. Дмитренко // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №8. – С.99-104.
91. Черноусов Н.Н. Исследование механики работы мелкозернистого шлакобетона при осевом растяжении и сжатии / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // Строительные материалы. – 2014. – № 12. – С. 59–63.
92. Маилян, Д.Р Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры / Д.Р. Маилян, Г.В. Несветаев, С.В. Халезин, А.А. Горцевской // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2018. – №2.

REFERENCES

1. Karpenko N. I., Kruglov V. M., Soloviev L. Yu. Nonlinear deformation of concrete and reinforced concrete. - Novosibirsk: Publishing house of SUSPS, 2001. - 276 p.
2. Sheikin A. E., Chekhovsky Yu. V., Brusser M. I. Structure and properties of cement concrete. Moscow: Stroyizdat, 1979. - 344 p.
3. Grushko I. M. Tensile strength of concrete / I. M. Grushko, A. G. Ilyin, S. T. Rashevsky. - Kharkov: Publishing house of Kharkov University, 1973. - 155 p.
4. Polystructural theory of composite building materials / V. I. Solomatov, V. N. Vyrovoy, A. N. Bobryshev, et al. - Tashkent: Fan, 1991. - 342 p.
5. Iskhakov, I., Frolov, I., Ribakov, Y., 2022. Experimental verification of theoretical stress-strain model for compressed concrete considering the post-peak stage // Materials 15(17), 6064.
6. Y. Feng, Y. Su, N. Lu, S. Shah, Meta concrete: exploring the novel functionality of concrete using nanotechnology, Eng. Sci. (2020), <https://doi.org/10.30919/es8d816>.
7. S. Barbhuiya, B.B. Das, Water-soluble polymers in cementitious materials: a comprehensive review of roles, mechanisms, and applications, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023) e02312, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02312>.
8. N. P. Tran, T. N. Nguyen, T. D. Ngo, The role of organic polymer modifiers in cementitious systems towards durable and resilient infrastructures: a systematic review, Constr. Build. Mater. 360 (2022) 129562, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129562>.
9. Javadi A., Jamil T., Abouzari-Lotf, E., Soucek, M. D., & Heinz, H. (2021). Working mechanisms and design principles of comb-like polycarboxylate ether superplasticizers in cement hydration: quantitative insights for a series of well-defined copolymers. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(25), 8354–8371.
10. L. Xia, M. Zhou, T. Ni, Z. Liu. Synthesis and characterization of a novel early-strength polycarboxylate superplasticizer and its performances in cementitious system, J. Appl. Polym. Sci. 137 (2020) 48906.
11. X. Liu, G. Lai, J. Guan, S. Qian, Z. Wang, S. Cui, F. Gao, Y. Jiao, R. Tao, Technical optimization and life cycle assessment of environment-friendly superplasticizer for concrete engineering, Chemosphere 281 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130955>.

12. Muthukumar, M., Mohan, D., 2004. Optimization of mechanical properties of concrete polymer and mix design recommendation based on design of experiments. *J. Appl. Polym. Sci.* 94(3), 1107–1116.
13. Khalid M. Y, Al Rashid A, Arif Z. U, Akram N, Arshad H, Garcia Marquez FP. Characterization of failure strain in fiber reinforced Composites: under on-Axis and off-Axis loading. *Crystals* 2021;11:216. <https://doi.org/10.3390/cryst11020216>.
14. Dobiszewska M, Schindler AK, Pichór W. Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Constr Build Mater* 2018;177:222–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>.
15. Peng Y, Zhang J, Liu J, Ke J, Wang F. Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Constr Build Mater* 2015;101:482–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046>.
16. Travush V. I., Karpenko N. I., Erofeev V. T., Vatin N. I., Erofeeva I. V., Maksimova I. N., Kondrashchenko V. I., Kesarijskij A. G. Destruction of powder-activated concrete with fixation of destruction by a laser interferometer // Magazine of Civil Engineering. Volume 95, Issue 3, 2020. – P. 42–48.
17. Saran, ASA, Magudeaswaran P, Mohammed MK. Concrete Microstructure- A Review, vol. 2; 2016.
18. Elsharief A, Cohen MD, Olek J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cem Concr Res* 2003;33:1837–49. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9).
19. Xie Ping J. J, Beaudoin R. B. Effect of aggregate size on transition zone properties at the Portland cement paste interface. *Cem Concr Res* 1991. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90059-Q](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90059-Q).
20. Liao K. Y., Chang P. K., Peng Y. N., Yang C. C. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:977–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.019>.
21. Neville A. M., Brooks J. J. Properties of concrete 2010. <https://doi.org/10.4135/9781412975704.n88>.
22. Erofeev V. T., Vatin N. I., Maximova I. N., Tarakanov O. V., Sanyagina Y. A., Erofeeva I. V., Suzdal'tsev O. V. Powder-activated concrete with a granular surface texture // International journal for computational civil and structural engineering. – 2022. – No. 4. – Т. 18. – P. 49–61.
23. Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater* 2015;101:741–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
24. Tam C. M., Tam V. W. Y., Ng K. M. Optimal conditions for producing reactive powder concrete. *Mag Concr Res* 2010;62:701–16. <https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.10.701>.
25. Hassan A. M. T, Jones S. W, Mahmud G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Constr Build Mater* 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>.
26. Chan Y. W., Chu S. H.. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:1167–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.
27. Kang S. T., Lee Y., Park Y. D., Kim J. K. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.012>.
28. Ma J., Orgass M., Dehn F., Schmidt Du, Tue N. V. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with or without coarse aggregates. *Proc Int Symp Ultra High Perform Concr* 2004:205–12.
29. Zdeb T. An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes. *Constr Build Mater* 2017;131:758–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.026>.
30. Rabinovich F. N. Dispersion-reinforced concrete. - Moscow: Stroyizdat, 1989. - 176 p.
31. Zhang, L., Zhang, M., Wang, K., Shi, J., Chen, W., Yan, K. Axial compressive behavior of steel-reinforced reactive powder concrete short columns (2022) *Structures*, 46, pp. 433-444.
32. Bu, L., Tang, D. Experimental Study and Numerical Analysis on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with RPC Reinforcement Mesh (2022) *Shenyang Jianzhu Daxue Xuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 38 (4), pp. 601-609.
33. Xu, S., Wu, P., Zhou, F., Li, Q., Zeng, T., Jiang, X. Experimental investigation and numerical prediction on resistance of reactive powder concrete to multiple penetration (2021) *Baozha Yu Chongji / Explosion and Shock Waves*, 41 (6), art. no. 063301.
34. Guo, M., Gao, R. Relationships among the characteristic tensile strain, curing age, and strength of reactive powder concrete (2021) *Materials*, 14 (10), art. no. 2660, .
35. Jia, F., He, K., Wang, W., An, M., Lu, Z. Splitting tensile bonding strength of Reactive Powder Concrete to normal concrete (2016) *Tiedao Xuebao / Journal of the China Railway Society*, 38 (3), pp. 127-132.
36. Cheng, J., Luo, X., Zhuang, Y., Xu, L., Luo, X. Experimental study on dynamic response characteristics of RPC and RC micro piles in SAJBs (2019) *Applied Sciences* (Switzerland), 9 (13), art. no. 2644, .
37. Ju, Y., Shen, H., Wang, D., Zheng, W. Experimental study on crack resistance of reactive powder concrete beam-column joints (2019) *ZhongnanDaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*, 50 (5), pp. 1203-1209.
38. Cui, B., Wang, K.-K., Zhou, Q.-F., Deng, K.-L., Wei, L.-Y. Experiment on Static and Fatigue Performances of Assembled Concrete-steel Link in Assembled Composite Bridge Deck (2018) *ZhongguoGongluXuebao/China Journal of Highway and Transport*, 31(12), pp. 106-114.

39. Zhao, C., Wang, K., Zhou, Q., Deng, K., Cui, B. Full-Scale Test and Simulation on Flexural Behavior of Dovetail-Shaped Reactive Powder-Concrete Wet Joint in a Composite Deck System (2018) Journal of Bridge Engineering, 23 (8), art. no. 04018051.
40. Pan, W.-H., Fan, J.-S., Nie, J.-G., Hu, J.-H., Cui, J.-F. Experimental Study on Tensile Behavior of Wet Joints in a Prefabricated Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin Reactive-Powder Concrete Layer (2016) Journal of Bridge Engineering, 21(10), art. no. 04016064.
41. Han, L.Z., Zhang, J.Q., Nie, J.G. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2014) Advanced Materials Research, 900, pp. 473-482.
42. Zhang, Y., Yan, G., An, M., Zhong, T. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams (2009) Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University, 33 (1), pp. 81-85.
43. Yan, R., Du, H., Xu, Y. Mechanical and thermal expansion properties of RPC with steel fibers after exposure to elevated temperatures (2018) Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering, 0.
44. Jin, L., He, P., Fu, Q., Chen, M. Relationship of macro cracks and microstructure of RPC component (2014) Jiangsu DaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 35 (4), pp. 452-456 and 462.
45. Zhang, M., Zeng, B. Reliability-based calibration of material partial factor of prestressed reactive powder concrete members (2015) Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal, 48, pp. 88-97.
46. Cao, X., Peng, J.-C., Jin, L.-Z. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam (2014) Wuhan LigongDaxueXuebao/Journal of Wuhan University of Technology, 36 (1), pp. 116-122.
47. Deng, Z., Chen, C., Chen, X. Experimental research on the shear behaviors of hybrid fiber reinforced RPC beams (2015) Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal, 48 (5)
48. Deng, Z., Zhou, D., Cheng, S. The shear bear capacity of reactive powder concrete beam with high strength stirrup (2014) Harbin GongchengDaxueXuebao/Journal of Harbin Engineering University, 35 (12), pp. 1512-1518.
49. Ji, W., Zhou, C. Shear lag analysis of prestressed RPC box girder (2007) ZhongguoTiedaoKexue/China Railway Science, 28 (1), pp. 19-22.
50. He, F., Huang, Z.-Y., Yi, W.-J. Acid-resistance performance of reactive powder concrete (2011) Journal of Natural Disasters, 20 (2), pp. 44-49. 4922-21.
51. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design of simple-supported reactive powder concrete railway bridge with a span of 32m (2011) Advanced Materials Research, 163-167, pp. 904-907.
52. Lu, S.-S., Zheng, W.-Z. Calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars (2010) Harbin GongyeDaxueXuebao/Journal of Harbin Institute of Technology, 42 (4), pp. 536-540.
53. Yan, Z., Ji, W., An, M. Design and experimental study of low-height reactive powder concrete beams (2009) Tumu GongchengXuebao/China Civil Engineering Journal, 42 (5), pp. 96-102.
54. Yan, Z., Ji, W., An, M. Experimental study and full-range analysis of Reactive Powder Concrete T-beams (2009) Beijing JiaotongDaxueXuebao/Journal of Beijing Jiaotong University, 33 (1), pp. 86-90.
55. Panfilov, D. A. Review of existing concrete deformation diagrams under compression in domestic and foreign regulatory documents / D. A. Panfilov, A. A. Pishchulev, K. I. Gimadetdinov. - (Technical regulation). - Text: direct // Industrial and civil engineering. - 2014. - No. 3. - P. 80-84.
56. Bezgodov, I. M., Dmitrenko, E. N. Improvement of curvilinear concrete deformation diagrams // Industrial and civil engineering. 2019. No. 8. P. 99-104. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.99-104.
57. Rakhmanov V. A., Safonov A. A. Development of experimental methods for assessing concrete deformation diagrams under compression // Academia. Architecture and Construction. - 2017. - No. 3. - P. 121-125.
58. Galustov K. Z. Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures / K. Z. Galustov. - Moscow: Fizmatlit, 2006. - 248 p.
59. Maksimova I. N. Structure and structural strength of cement composites: monograph / I. N. Maksimova, N. I. Makridin, V. T. Erofeev, Yu. P. Skachkov // Moscow: ASV Publishing House, 2017. – 400 p.
60. Bragov A. M., Gonov M. E., Lomunov A. K., Balandin Vl. VI. Experimental study of the dynamic properties of concrete under compressive load // Chapter 23 In: B. E. Abali and I. Giorgio (eds.), Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics, Advanced Structured Materials, 2020, vol 130. – P. 403–412.
61. Bragov A. M., Konstantinov A. Yu., Lamzin D. A., Lomunov A. K., Gonov M. E. Determination of the mechanical properties of concrete using the split Hopkinson pressure bar method // Procedia Structural Integrity 28 (2020) 2174–2180.
62. Bragov A. M., Gonov M. E., Lamzin D A., Lomunov A. K., Modin I. A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics, 2021, 47(6) 962-967.
63. Gonov M., Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A. Features of high-speed deformation and fracture of fine-grained concrete under tensile stress // Advanced Materials Modeling for Mechanical, Medical and Biological Applications. – 2021. – P. 193–211.

64. Gonov M. E., Bragov A. M., Konstantinov A. Y., Lomunov A. K., Filippov A. R. Features of High-Speed Deformation and Fracture of Fine-Grained Concrete Under Tensile Stress // Chapter 5. In: Altenbach H., Eremeyev V. A., Galybin A., Vasiliev A. (eds) Advanced Structured Materials, Advanced Materials Modeling for Mechanical, Medical and Biological Applications, vol 155. – 2022. – P. 193–211.
65. Varlamov A. A., Rimshin V. I. Models of Concrete Behavior. General Theory of Degradation. – Moscow: INFRA-M, 2019. – 436 p.
66. Pavluk A., Gomon S., Ziatuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. – 2023. – 65(2). – P. 109–121.
67. Bakushev S. V. Approximation of strain diagrams by bilinear functions // Structural Mechanics and Analysis of Structures. – 2019. No. 2 (283). – P. 2–11.
68. Bakushev S. V. Approximation of strain diagrams by quadratic functions // Structural Mechanics and Analysis of Structures. – 2020. No. 3 (290). – P. 2–14.
69. Bertron A., Duchesne J. Attack of cementitious materials by organic acids in agricultural and agrofood effluents // RILEM State-of-the Art Reports. – 2013.
70. Vupputuri S., Fathepure B. Z., Wilber G. G. and 4 more. Isolation of a sulfur oxidizing *Streptomyces* sp. from deteriorating bridge structures and its role in concrete deterioration // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2015.
71. Dubravka B., Marijana S., Igor C. Review of microbial corrosion of concrete // Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society. – 2010.
72. Strokova V., Nelyubova V., Rykunova M. and 1 more, Strength and structure of cement stone exposed to domestic chicken coop // Journal of Physics: Conference Series. – 2019.
73. Lapcharatsangroj L., Chalida U.-T. Trial to Determine Durability and Serviceability for Swine Farm in Thailand // MATEC Web of Conferences. – 2018.
74. Barbhuiya S., Kumala D. Behavior of a sustainable concrete in acidic environment // Sustainability (Switzerland). – 2017.
75. Wei S., Jiang Z., Liu H. and 2 more. Microbiologically induced deterioration of concrete - A review // Brazilian Journal of Microbiology. – 2013.
76. Lanzón, M., García-Ruiz, P.A. Deterioration and damage evaluation of rendering mortars exposed to sulfuric acid // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010,
77. Wei S., Sanchez M., Trejo D. and 1 more. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2010.
78. De Belie N. Microorganisms versus stony materials: A love hate relationship // Materials and Structures / Materiaux et Constructions. – 2010.
79. Yousefi A., Allahverdi A., Hejazi P. Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition // International Biodeterioration and Biodegradation. – 2014.
80. George R. P., Ramya S., Ramachandran D. and 1 more. Studies on Biodegradation of normal concrete surfaces by fungus *Fusarium* sp. // Cement and Concrete Research. – 2013.
81. Soleimani S., Ormeci B., Isgor O. B. Growth and characterization of *Escherichia coli* DH5 α biofilm on concrete surfaces as a protective layer against microbiologically influenced concrete deterioration (MICD) // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2013.
82. Li H., Liu D., Lian B. and 2 more. Microbial Diversity and Community Structure on Corroding Concrete // Geomicrobiology Journal. – 2012.
83. Fiertak M., Stanaszek-Tomal E., Kozak A. The growth of fungi and their effect on the behavior of cement polymer composites // Advances in Cement Research. – 2015.
84. Geweely N. S. I. Evaluation of ozone for preventing fungal influenced corrosion of reinforced concrete bridges over the River Nile, Egypt // Biodegradation. – 2011.
85. Biological resistance of materials / V.I. Solomatov, V.T. Erofeev, V.F. Smirnov, et al. – Saransk: Publishing house of Mordovia University, 2001. – 193 p.
86. Pereyra A. M., Gonzalez M. R., Rodrigues T. A. and 2 more. Enhancement of biocorrosion resistance of epoxy coating by addition of Ag/Zn exchanged a zeolite // Surface and Coatings Technology. – 2015.
87. Munzer C., Belhaj E., Meylheuc T. and 2 more. Effects of bioadmixture on surface characteristics of cement pastes // Materiaux et Techniques. – 2015.
88. Vipulanandan C., Liu J. Polymer Coatings for Concrete Surfaces: Testing and Modeling // Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition. – 2012.
89. Viktoria Il'ina, Valeria Strokova, Vladimir Erofeev, Irina Stepina. Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // Architecture and Engineering Journal, Vol 9, No. 3, 2024. – P. 53–62.
90. Bezgodov, I.M. Improvement of curvilinear diagrams of concrete deformation / I.M. Bezgodov, E.N. Dmitrenko // Industrial and civil engineering. – 2019. – No. 8. – P. 99–104.
91. Chernousov, N.N. Study of the mechanics of fine-grained cinder concrete under axial tension and compression / N.N. Chernousov, R.N. Chernousov, A.V. Sukhanov // Construction materials. – 2014. – No. 12. – P. 59–63.

92. Mailyan, D.R. Deformation properties and parametric points of frame concrete / D.R. Mailyan, G.V. Nesvetaev, S.V. Khalezin, A.A. Gortsevskoy // Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don". - 2018. - No. 2.

Информация об авторах:

Ерофеев Владимир Трофимович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26), Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов.
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Гончарова Маргарита Александровна

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения и дорожных
технологий кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Тараканов Олег Вячеславович

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры кадастра недвижимости и права.
E-mail: tarov60@mail.ru

Светлов Дмитрий Анатольевич

ООО «Софт Протектор» (195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 28, литер Ц, помещ. 1591)
доктор технических наук, директор
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Максимова Ирина Николаевна

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза, Россия,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: maksimova@pguas.ru

Ерофеева Ирина Владимировна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва,
Ярославское ш., 26), Россия,
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Кучин Вячеслав Николаевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д. 2)
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Светлов Д.В.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург,
Петропавловская ул, д. 29)
аспирант
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Information about authors:

Erofeev Vladimir T.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26),
Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials.
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Goncharova Margarita A.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science and Road Technologies
of the Department of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: magoncharova777@yandex.ru

Tarakanov Oleg V.

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Real Estate Cadastre and Law.
E-mail: tarov60@mail.ru

Svetlov Dmitry A.

Soft Protector LLC (195030, St. Petersburg, Khimikov St., 28, letter C, room. 1591)
Doctor of Technical Sciences, Director
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Maximova Irina N.

Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: maksimova@pguas.ru

Erofeeva Irina V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26),
Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Kuchin Vyacheslav N.

St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II (199106, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 Line, 2)
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Svetlov D.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya Ulitsa, 29)
Postgraduate Student
E-mail: erofeevvt@bk.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2025
Одобрена после рецензирования 19.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 01.11.2025
Approved after reviewing 19.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025

Е.В. ТКАЧ¹, Ю.С. ФИЛИМОНОВА², А.А. ЧЕРНЫХ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация. Для создания эффективных условий использования мелиорируемых земель и их плодородия необходимо обеспечить строительство и эксплуатацию разветвленной системы оросительных систем (лотков) с высокой степенью долговечности и надежности на протяжении всего периода эксплуатации. В рамках данных исследований рассматриваются вопросы, связанные с повышением эксплуатационных характеристик модифицированного тяжелого бетона, работающего в суровых условиях эксплуатации. Целью исследования является установление возможности управления зерновым составом цементного вяжущего, модифицированного комплексным модификатором (суперпластификатор + полимер + микрокремнезем) за счет формирования пространственно-армированной мелкокристаллической структуры цементной матрицы с максимально плотной упаковкой, которая сохраняется во времени. Наличие в комплексном модификаторе микрокремнезёмистого компонента способствует протеканию пущолановой реакции с образованием химически стойких низкоосновных гидросиликатов кальция, что положительно влияет на коррозионную стойкость бетона. Объект исследования: тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором (суперпластификатор + полимер + микрокремнезем), армированный базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства, в частности лотков оросительных систем. В работе использованы следующие методы исследования: лазерной гранулометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов; в целях формирования плотных упаковок тонкодисперсных фракций клинкерного компонента применялся метод математической обработки полученных экспериментальных данных. Результаты исследований: получены новые данные, дополняющие теоретические представления о процессе структурообразования тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с управляемым зерновым составом совместно с комплексным модификатором и армированным базальтовым волокном. Разработан состав и технологические решения получения эффективного тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства с повышенными эксплуатационными характеристиками: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость F1=600, повышенная стойкость к агрессивным средам.

Ключевые слова: гидромелиоративное строительство, полидисперсное вяжущее, комплексный модификатор, коррозионная стойкость.

E.V. TKACH¹, YU.S. FILIMONOVA², A.A. CHERNYKH¹

¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

STUDY OF PERFORMANCE PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE BASED ON POLYDISPERSED BINDING AGENT FOR WATER RECLAMATION CONSTRUCTION

Abstract. To effectively utilize reclaimed land and maintain its fertility, it is necessary to ensure the construction and operation of a comprehensive irrigation system (troughs) with a high degree of durability and reliability throughout the entire service life. This research examines issues related to improving the performance of modified heavy-duty concrete operating under harsh conditions. The objective of this study is to establish the feasibility of controlling the grain size distribution of a cement binder modified with a complex modifier (superplasticizer + polymer + microsilica) by forming a spatially reinforced, fine-crystalline structure of the cement matrix with the highest possible packing density, which is maintained over time. The presence of a microsilica component in the complex modifier promotes a pozzolanic reaction with the formation of chemically stable, low-basic calcium hydrosilicates, which positively impacts the corrosion resistance of concrete. Object of study: heavy-duty concrete based on a polydisperse binder with a complex modifier (superplasticizer + polymer + microsilica), reinforced with basalt fiber for irrigation and drainage construction, specifically irrigation system trays. The following research methods were used in the study: laser granulometry, X-ray phase analysis, electron microscopy, and chemical analysis. Mathematical processing of the obtained experimental data was used to form dense packings of finely dispersed fractions of the clinker component. Research results: new data were obtained that complement theoretical understanding of the structure formation process of heavy-duty concrete based on a polydisperse binder with a controlled grain size distribution, combined with a complex modifier and reinforced with basalt fiber. A composition and technological solutions have been developed for producing effective heavy concrete for irrigation and drainage construction with improved performance characteristics: compressive strength – 77.3 MPa; tensile strength in bending – 8.62 MPa; water absorption – 1.9%; water resistance grade – W14; frost resistance F1=600, increased resistance to aggressive environments.

Keywords: irrigation and drainage construction, polydisperse binder, complex modifier, corrosion resistance.

1. Введение

В современном гидротехническом и гидромелиоративном строительстве используют преимущественно модифицированные бетоны [1-5], которые позволяют обеспечить заданный уровень качества. Анализ научных исследований показал, что основными положительными функциями введения модификаторов в цементные системы являются: снижение вязкости цементных систем для улучшения технологических свойств бетонных смесей, вследствие чего достигается увеличение удобоукладываемости бетонных смесей вплоть до достижения «литой», самоуплотняющейся консистенции при нормальных расходах исходных материалов [6-8]; сокращение расхода воды затворения более чем на 20% и получение бетонов повышенной прочности или высокопрочного бетона (B40 и выше) из удобоукладываемых бетонных смесей на основе обычных портландцементов [9-14]; изменение структуры цементного камня и бетона, направленное на увеличение их прочности до 40% и стойкости к многократным попеременным физическим воздействиям [15-18]; регулирование скорости процессов гидратации цементов и твердения бетонов [19-20]; снижение расхода цемента в пределах до 25% при обеспечении заданной удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона [21]; комбинирование приведенных эффектов для получения бетонной смеси и бетона заданных свойств [22]. Таким образом, повышение качества бетона для гидротехнического строительства, в частности гидромелиоративного является проблемным вопросом и требует своего развития с учетом развивающейся на современном этапе технологической парадигмы, предусматривающей создание структуры бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем использования высокопрочных вяжущих веществ, обеспечивающих высокую плотность упаковки исходных частиц в каждом микрообъёме материала совместно с комплексным модификатором.

2. Модели и методы

Методологической основой исследований являются научные разработки в области получения тяжелых бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками, а также применение системно-структурного подхода строительного материаловедения «состав – структура – свойства». Для определения основных характеристик сырьевых материалов,

бетонных смесей в вязкопластичной стадии и затвердевшего бетона применялись общепринятые в строительной практике нормативные методы, дающие высокую точность, достоверность и воспроизводимость результатов. Эксперименты проводились в строгом соответствии с методикой, образцы подготавливались посерьйно с соблюдением всех параметров выдержки и хранения до испытания. Общая схема исследования включала в себя логически взаимосвязанные этапы современного научного метода, в частности, концептуального планирования эксперимента с выделением наиболее важных исследуемых характеристик, определения необходимых свойств исходных компонентов, расчёта требуемых дозировок, основанного на рабочей гипотезе, непосредственного эксперимента с контролем характеристик на всех его стадиях, статистической обработки результатов эксперимента, анализа результатов и последующей оптимизации, проведения следующей подтверждающей серии экспериментов.

В работе использовали исходные материалы со следующими характеристиками. Минеральное вяжущее – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, ООО «Холсим (Рус) СМ» (ГОСТ 31108-2020); природный песок с модулем крупности 2,5 (Хромцовский карьер; ГОСТ 8736-2014); гранитный щебень, фр. от 5 до 15 мм, ООО «Богаевский карьер» (ГОСТ 8267-93); суперпластифицирующая добавка – «Melflux 5581F» (ГОСТ 24211-2008), полимерная добавка – «ПОЛИДОН-А» (ООО «Оргполимерсинтез»; ТУ 9365-002-46270704-2001); микрокремнезем марки МКУ-95 (ООО НТЦ "ЭВЕРЕСТ"; ГОСТ Р 58894-2020); рубленое базальтовое волокно (БВ) (ООО «ИнРеC»; ТУ 5952-002-13307094-08).

Для тонкого помола клинкерного компонента использовалась планетарная шаровая мельница Fritsch Pulverisette 7. Последовательно были получены три серии образцов тонкоизмельчённого вяжущего с удельной поверхностью 150, 300 и 450 м²/кг соответственно. Тонкость помола вяжущего контролировалась путём рассева навески на стандартном наборе сит. Измерение получаемой удельной поверхности и последующий расчёт размера частиц тонкоизмельчённого вяжущего проводилось при помощи прибора ПСХ-11М. Прибор в своей работе использует метод газопроницаемости Козени-Кармана, заключающийся в определении времени прохождения фиксированного объема воздуха через слой образца, после чего производится расчёт удельной поверхности с коррекций вязкости воздуха с учётом его температуры. Для проведения рентгенофазового анализа цементного камня был использован порошковый рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М. Исследование физико-механических характеристик, полученных цементных камней и бетонов контролировались при помощи автоматической испытательной прессовой системы Controls MCC8. Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром 100 мм. Время выдержки образцов составила 24 часа при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 часа при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 часов при полном погружении. Процесс испытания шел до появления структурных дефектов образцов – трещин, сколов и шелушения, потери массы и потери прочности образцов более чем на 5% от требуемого значения. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки для определения водонепроницаемости бетонных образцов методом «мокрого пятна» Form+Test WE 6 MMZ.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием нормативных документов, широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований и воспроизводимостью результатов с вероятностью 0,95 при большом объеме экспериментов; положительными результатами опытно-промышленного внедрения и практической апробации разработанного эффективного бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором, армированного базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства. В целях получения оптимального состава полидисперсного вяжущего исследовались топологические

характеристики получаемых цементных композиций с применением программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop and Roll». Анализ научных литературных источников показал [23, 24], что для уменьшения влияния «пристенного эффекта», отношение диаметра частицы к размеру упаковки должно быть > 20 . В связи с тем, что расчёт упаковки в 20 диаметров наибольшей сферы займет очень продолжительное время, было принято решение изучать единичную ячейку, с отношением большего диаметра сферы к стороне 1 к 14. В нашем случае наибольший диаметр равен 12 мкм, что согласуется с данными гранулометрического состава используемых порошков, следовательно размер ячейки будет $168 \times 168 \times 168$ мкм. Исходные данные для расчета топологических характеристик и влияния зернового состава, вяжущего на плотность упаковки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета топологических характеристик

№	Дисперсные составы цементных частиц						Прочность цементного камня на сжатие МПа, в возрасте, сут.	
	Удел. поверхность составов, $\text{м}^2/\text{кг}$			Состав, %			7	28
1	ЦЕМ 42,5 Н контр.						28,4	43,5
2	150	0	0	100	0	0	20,3	25,2
3	0	300	0	0	100	0	26,2	39,4
4	0	0	450	0	0	100	38,6	49,7
5	150	300	0	20	80	0	24,1	39,6
6	150	300	0	25	75	0	20,7	31,3
7	150	300	0	30	70	0	19,0	28,6
8	0	300	450	0	80	20	41,2	58,5
9	0	300	450	0	75	25	47,4	60,7
10	0	300	450	0	70	30	50,6	63,2
11	150	300	450	15	80	5	40,2	52,0
12	150	300	450	15	75	10	44,6	56,4
13	150	300	450	15	70	15	48,5	57,8

Учитывая факт повышения энергозатрат при получении тонкодисперсного порошка с удельной поверхностью $450 \text{ м}^2/\text{кг}$, было принято решение взять за оптимальную упаковку состав 12 (таблица 1) с соотношением цементных частиц в %: 15 – со средним диаметром $d_{cp}=12$ мкм и удельной поверхностью $S_{уд}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$; 75 – $d_{cp}=6,6$ мкм, $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 10 – $d_{cp}=4,9$ мкм, $S_{уд}=450 \text{ м}^2/\text{кг}$. С помощью метода планирования эксперимента установлены зависимости влияния управляемых факторов на выделенные параметры качества бетона. Получены регрессионные уравнения второго порядка, которые адекватно описывают зависимость прочности на сжатие, условного коэффициента интенсивности напряжений в возрасте 28 суток нормального твердения и водопоглощения модифицированного тяжелого бетона в возрасте 28 суток нормального твердения от переменных X_1 – расход полимерной добавки Полидон-А и X_2 – расход базальтового волокна, % от массы вяжущего. В качестве управляемых факторов целевых функций экспериментальной модели были выбраны: Y_1 – прочность на сжатие ($R_{сж}$, МПа), Y_2 – условный коэффициент интенсивности напряжений (K_c^* , $\text{МПа} \times \text{м}^{0,5}$), Y_3 – водопоглощение (W_m , %). Входные факторы, влияющие на исследуемые характеристики, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Интервалы и уровни варьирования входных факторов для планирования эксперимента второго порядка

Варьируемые факторы		Основные уровни	Интервалы варьирования
X ₁	Содержание полимерной добавки Полидон-А	0,2	0,1
X ₂	Содержание волокна	0,7	0,15

Уравнения регрессии для модифицированного тяжелого бетона имеют следующий вид:

$$Y_1 = 77,3 + 1,62X_1 + 1,13X_2 + 2,15X_1X_2 - 7,37X_1^2 - 6,44X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,074 + 0,002X_1 + 0,001X^2 + 0,003X_1X_2 - 0,005X_1^2 - 0,004X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1,9 - 0,2X_1 - 0,11X_2 - 0,25X_1X_2 + 0,65X_1^2 + 0,45X_2^2 \quad (3)$$

Адекватность уравнений регрессии проверялась автоматически по критериям Стьюдента и Фишера. Ошибка при аппроксимации находилась в пределах 1...2 %. Используя инструменты компьютерной программы Matlab R2015b найдено максимальное значение целевой функции регрессионного уравнения второго порядка: MAX Y_{1max} = 77,3538 при X₁ = 0,0244, X₂ = 0,0918, что в натуральных значениях составляет 0,202% и 0,714%, соответственно. MAX Y_{2max} = 0,0744 при X₁ = 0,2676, X₂ = 0,2254, что в натуральных значениях составляет 0,227% и 0,734%, соответственно. MIN Y_{3min} = 2,352 при X₁ = 0,380, X₂ = 0,120, что в натуральных значениях составляет 0,238% и 0,718%, соответственно. Установлены оптимальные значения X_{1опт} = 0,2; X_{2опт} = 0,7 в натуральном виде, при которых функция Y₁ – прочность на сжатие (R_{сж}) принимает максимальное значение, а Y₃ (водопоглощение, W_m) – минимальное. После подстановки найденных значений в уравнения 2-4 были определены прочность на сжатие R_{сж} = 77,3 МПа, K_c^{*} = 0,074169 МПа^{0,5}; водопоглощение W_m = 1,9 %.

3. Результаты исследования и их анализ

Для оценки влияния комплексного модификатора (Melflux 5581F + Полидон-А + микрокремнезем) на качество модифицированного цементного камня были изготовлены образцы различных составов из теста нормальной густоты (таблица 3).

Таблица 3 – Составы цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из цементного теста нормальной густоты

Материалы	Расход материалов для получения цементного теста нормальной густоты, г					
	1	2	3	4	5	6
ЦЕМ I 42,5 Н (заводской)	400	-	-	-	-	-
Полидис. вяжущее ПВ (контр.) фр. м ² /кг: 150 (15%) + 300 (75%) + 450 (10%) контр.	-	400	400	400	400	340
МК (15%)	-	-	-	-	-	60
Гипс. камень (3%)	-	12	12	12	12	12
Melflux 5581 F (0,3%)	-	-	1,2	-	1,2	1,2
Полидон-А (0,2%)	-	-	-	0,8	0,8	0,8
B/C	0,3	0,26	0,18	0,21	0,17	0,20
Сроки схват. цем.теста , ч-мин нач. схв. / кон. схв.	2-55 8-20	1-32 6-15	2-05 7-10	2-15 7-25	2-10 7-20	2-20 7-30
R _{сж} 3 сут., МПа	18,4	23,2	24,8	24,0	25,8	26,5
R _{сж} 28 сут., МПа	43,5	52,4	60,8	59,2	65,5	82,5

Анализ данных таблицы 3 показал, что в составе 2 снизилось В/Ц на 13,3% и сократились сроки схватывания; прочность на сжатие в возрасте 3 и 28 сут. увеличились на 26,1 и 20,5% в сравнении с составом 1. При добавлении к ПВ Melflux 5581F (состав 3) снизилось В/Ц на 30,8%; при этом сроки схватывания увеличились, а прочность в возрасте 3 и 28 сут. повысилась на 6,9 и 16% в сравнении с составом 2. В составе 4 ПВ+Полидон-А повысилось В/Ц на 16,7% и увеличились сроки схватывания; прочность в возрасте 3 и 28 сут. незначительно снизилась с 24,8 до 24,0 и 60,8 до 59,2 МПа в сравнении с составом 3. Совместное введение в ПВ (суперпластификатора Melflux 5581F + Полидон-А) положительно повлияло на водопотребность и прочность: В/Ц снизилось на 34,6%, прочность в возрасте 3 и 28 сут. увеличилась на 11,2 и 25% в сравнении с контр. (состав 2). Максимальную прочность 82,5 МПа показал состав 6, содержащий активную минеральную добавку микрокремнезем марки МКУ-95, наличие которого позволит решить задачу коррозионной стойкости. Фазовый состав образцов цементного камня, рассчитанный на основе полученных данных РФА, представлен на рисунке 1.

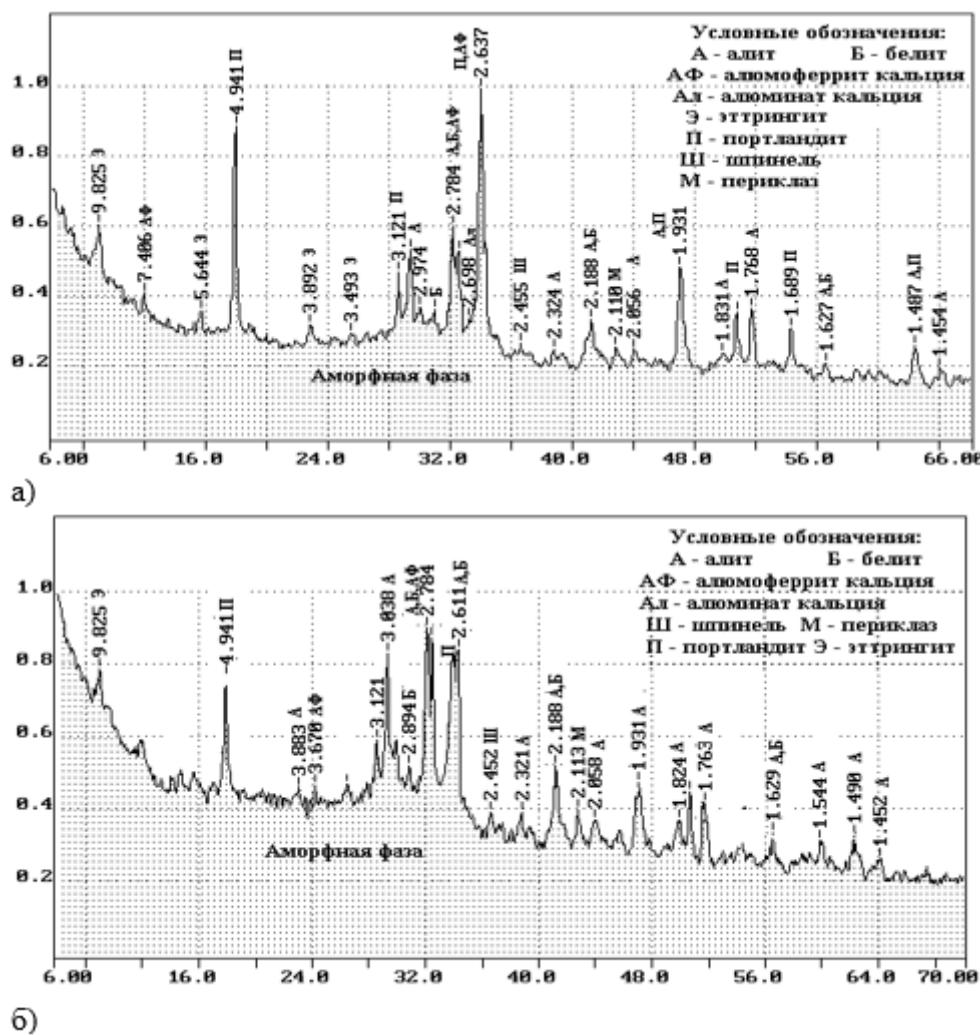


Рисунок 1 – Рентгенофазовый анализ гидратированных образцов цементного камня в возрасте 28 суток твердения: а) 1 состав – ЦЕМ I 42,5Н б) ПВ+CaSO₄·2H₂O+Melflux+Полидон-А+МК

Результаты рентгенофазового анализа показали, что в составе 2 (ПВ) увеличилось содержание C₃S и C₂S в сравнении с составом 1, а степень гидратации снизилась с 70 до 52% соответственно. Уменьшение степени гидратации объясняется наличием в составе 2 крупных непрогидратированных зерен вяжущего (фракция 150 м²/кг), которые образуют запас клинкерного фонда. При добавлении к ПВ отдельно Melflux и Полидон-А (составы 3 и 4,

таблица 3) наблюдалось незначительное снижение C_3S и C_2S на 2-3% в сравнении с контрольным (состав 2). Совместное их введение в ПВ (состав 5, табл. 3) показало незначительное снижение основных клинкерных минералов, при этом степень гидратации увеличилась до 57% в сравнении 3 и 4 составом. Для повышения стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания в состав 6 добавили (15% МКУ-95). При этом содержание остаточных клинкерных минералов снизилось незначительно, а количество $Ca(OH)_2$ уменьшилось более чем на 26,6% в сравнении с контрольным. Этот факт является свидетельством протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся связыванием $Ca(OH)_2$ микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция. Исследования микроструктуры цементного камня показали (рисунок 2), что наличие в составе комплексного модификатора (рисунок 2, в) позволило получить плотный цементный камень упорядоченной структуры с равномерно распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор. Установлено, что в составе 5 (таблица 3) уменьшаются размеры кристаллов – от 70 до 90 нм (рисунок 2, б), и составе 6 (таблица 3) – от 60 до 75 нм (рисунок 2, в), что значительно ниже, чем в контрольном 2 (таблица 4) – от 100 до 120 нм (рисунок 2, а).

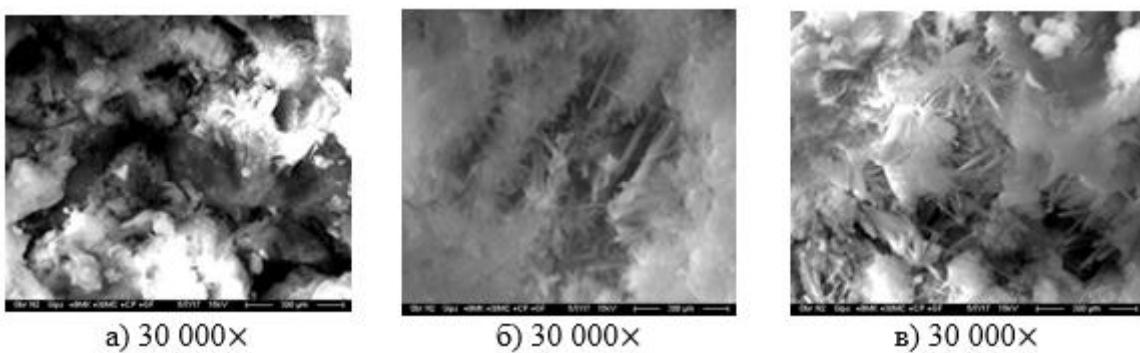


Рисунок 2 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения : а) Полидисперсное вяжущее - ПВ (контрольный); б) ПВ+(0,3%Мelflux+0,2%Полидон-А); в) ПВ+(0,3%Мelflux+0,2%Полидон-А+15% МК)

Модифицированный цементный камень (состав 6, таблица 3) имеет более плотную и однородную мелкопористую структуру с размером микропор от 0,1 до 0,6 мкм (рисунок 2, в); в составе 5 основной диапазон от 0,5 мкм до 2 мкм (рисунок 3, б); в контрольном образце состав 2 (таблица 3) – от 1 до 5 мкм (рисунок 3, а), с присутствием пор до 50 мкм. Положительные изменения в предлагаемом составе 6 обусловлены совместным влиянием комплексного модифицирования (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А+15%МК), сопровождающегося водоредуцирующим эффектом и образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Результаты исследований модифицированного цементного камня легли в основу разработки состава тяжелого бетона с заданным комплексом эксплуатационных свойств. Анализ исследований (таблица 4) свойств бетонных смесей показал, что предлагаемый состав 6 снизил в 2,1 и 2,2 раза показатели водоотделение и раствороотделения в сравнении с контрольным. Этот факт имеет положительную роль при снижении негативных последствий: расслоение бетонной смеси, оседания крупного заполнителя и снижение неоднородности бетона. Анализ результатов свойств модифицированных бетонов показал повышение показателей: на сжатие в составе ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) на 47,9% относительно контрольного (ПЦ+0,3%Melflux) и на 19,5% относительно состава (ПВ+0,3%Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12 МПа соответственно.

Таблица 4 – Свойства модифицированных бетонных смесей и бетонов

Показатели	Составы					
	1 контр. ПЦ+ 0,3% Melflux	2 ПВ +0,3% Melflux	3 ПВ +0,2% Полидон-А	4 ПВ+ 0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А	5 ПВ+ (0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А + 15%МК)	6 ПВ+(0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК) +0,7%БВ
Удобоукладыв аемость Марка/ОК, см	П2/5	П2/6	П2/5	П2/6	П2/7	П2/5
Водоотделение бет.см., %	0,45	0,31	0,24	0,20	0,19	0,22
Раствороотделе ние Пр, %	2,8	1,44	1,37	1,34	1,32	1,28
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2401	2408	2406	2411	2420	2417
Пористость, %	14,52	11,67	10,54	10,12	9,2	8,6
R _{cж} (ср.), МПа,	50,1	62,0	59,8	62,1	74,1	77,3
R _{tb} (ср.), МПа,	5,78	6,54	6,27	6,93	7,73	8,62

Максимальный прирост прочности R_{tb} имеет бетон с базальтовым волокном (состав 6). Показатель R_{tb} повысился на 49,1% в сравнении с контрольным и на 11,5% в сравнении с составом 5 (без фибры). По результатам гидрофизических испытаний модифицированного бетона (состав 6, таблица 4) установлено: водопоглощение снизилось на 57,8%; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным. Результаты испытаний на морозостойкость показали: максимальное снижение массы до 6,32% и кубиковой прочности на 26% в контрольном составе 1 после 400 циклов испытаний, что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012; высокую морозостойкость составы, содержащие комплексный модификатор. При 600 циклов испытаний потеря массы в составах 5 и 6 составила 1,8% и 1,5% при снижении прочности на 10,2% и 9,1% соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости.

4. Заключение

1. Обосновано и экспериментально доказано создание структуры тяжелого бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем оптимизации состава цементного, вяжущего различной дисперсности с комплексным модификатором (суперпластификатор +полимер +микрокремнезем) + базальтовое волокно.

2. Модифицированный бетон обладает следующими показателями: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость F1 = 600, повышенная стойкость к агрессивным средам.

3. Перспективы и рекомендации дальнейшей разработки темы исследования заключаются в совершенствовании состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором путем поиска новых видов модификаторов и микроармирующих наполнителей с целью снижения себестоимости продукции и исследовании возможностей его применения в гидротехнических сооружениях зоны переменного уровня воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Разработка строительных материалов на основе поливинилхлорида и эпоксидных полимеров, Строительные материалы. 2024. № 11. С. 55-62
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Garafiev A.M., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating, //Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). 1. DOI: 10.5822/2618-7183-2023-6-6-1
3. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer, // Magazine of Civil Engineering. 2021, 102. 10206. DOI: 10.34910/MCE.102.6
4. Asmatulayev B., Asmatulayev R., Asmatulayev N., Bakirbayeva A., Construction of Durable Roadsrom Rolled Concrete Based on Belite Slag Cement And Binders //International Journal of GEOMATE, Vol. 24, Issue 104, 2023, pp.27-35.
5. Es-samlali L., Yassine El Haloui, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmonaim Tlidi, & Abderrahman Bekri, Natural Aggregate Substitution by Steel Slag Waste for Concrete Manufacturing, //International Journal of GEOMATE, Vol. 26, Issue 115, pp. 61–72.
6. Bulgakov, B.I., Nguyen, V.Q.D., Aleksandrova, A.V., Larsen, O.A., Galtsheva, N.A. High-performance concrete produced with locally available materials. //Magazine of Civil Engineering. 2023. Magazine of Civil Engineering. 117(1). Article no. 11702. DOI: 10.34910/MCE.117.2
7. Ларсен О.А., Нарутъ В.В., Бахрах А.М. Пущолановая активность минеральных добавок для гидротехнических бетонов // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. №3. С. 250 – 260.
8. Nguyen Binh Ha, Le Ba Danh, Pham Duy Hoa, & Nguyen Ngoc Tuyen, Research on the Application of Geopolymer Concrete for Prestressed Girder Structures of Bridges Towards Sustainable Development, // International Journal of GEOMATE, Vol. 25, Issue 110, 2023, pp. 21–28.
9. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of civil engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34.
10. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // Advances in civil engineering materials. 2019. № 3. С. 153-172.
11. Kherraf L., Abdelouehed A., Belachia M., Hebhoub H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // International review of civil engineering. 2018. № 1(9). С. 31-39.
12. Урханова Л.А., Иванов А.И., Лхасаранов С.А. Hydraulic Engineering concrete based on a Composite Binder using dispersed perlite and a colloidal additive// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/ 2025/ Issue 1. Volume 21. PP. 69-78.
13. Урханова Л.А. Saidova, Z.; Yakovlev, G.; Orbán, Z.; Grakhov, V. Cement Compositions Modified with Dispersed Magnesium Silicate Dihydrate- and Carbon-Based Additives // Construction Materials. – 2022. №2. PP. 101-113. <https://doi.org/10.3390/constrmater2020008>.
14. Танг Л.В., Нгуен З.Ч., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов //Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. т. 17. № 1. с. 83-94
15. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23, С. 2642–2657. DOI10.1016/j.jmrt.2023.01.179
16. Fediuk R., Makarova N., Kozin A., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Nanomodified Basalt Fiber Cement Composite with Bottom Ash // Journal of Composites Science, 2023, 7(3), 96. DOI10.3390/jcs7030096
17. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками// Строительные материалы. 2011. № 2. С.47-51.
18. M. B. Kaddo, Yu.S. Filimonova Hydrophysical properties of heavy-duty concrete with a complex modifier for hydromeliorative construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 20(4) 72–80 (2024). DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-72-80>.
19. Ткач Е.В., Temirkanov R. I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilicon together with micro-reinforcing fiber to improve performance // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2021. – Vol. 332. – №. 5. – P. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3204
20. Rauza Serova, Evgeniya Stasilovich, Yedil Imanov, Tatyana Bogoyavlenskaya, Maksim Khan, Tkach E.B. Modified aerated concrete based on man-made waste // International Journal of GEOMATE, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.131-138 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2022.97.3334>
21. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method // Journal of sol-gel science and technology. 2019. № 3. С. 820-829.

22. Kalmagambetova A.Sh., Bogoyavlenskaya T.A., Effekt of physical of samplec on the mechanical charakterictiks, An International Journal “Advances in Materials Research”, Vol. 10, No. 1, 2021, pp. 67-76
23. Довгань И.В. Топологические аспекты структурообразования в дисперсных системах и вяжущих материалах / И.В. Довгань, А.В. Колесников, С.В. Семенова, Г.А. Кириленко // Строительные материалы. 2011. №3. С.100-102.
24. Королев Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 16-25.

REFERENCES

1. Khozin V.G., Abdurakhmanova L.A., Nizamov R.K. Razrabotka stroitel'nykh materialov na os-nove polivinilkhlorida i epoksidnykh polimerov, Stroitel'nyye materialy. 2024. № 11. S. 55-62
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Garafiev A.M., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating, //Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). 1. DOI: 10.5822/2618-7183-2023-6-6-1
3. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer, // Magazine of Civil Engineering. 2021, 102. 10206. DOI: 10.34910/MCE.102.6
4. Asmatulayev B., Asmatulayev R., Asmatulayev N., Bakirbayeva A., Construction of Durable Roadsrom Rolled Concrete Based on Belite Slag Cement And Binders //International Journal of GEOMATE, Vol. 24, Issue 104, 2023, pp.27-35.
5. Es-samlali L., Yassine El Haloui, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmonaim Tlidi, & Abderrahman Bekri, Natural Aggregate Substitution by Steel Slag Waste for Concrete Manufacturing, //International Journal of GEOMATE, Vol. 26, Issue 115, pp. 61–72.
6. Bulgakov, B.I., Nguyen, V.Q.D., Aleksandrova, A.V., Larsen, O.A., Galtseva, N.A. High-performance concrete produced with locally available materials // Magazine of Civil Engineering. 2023. Maga-zine of Civil Engineering. 117(1). Article no. 11702. DOI: 10.34910/MCE.117.2
7. Larsen O.A., Narut' V.V., Bakhra A.M. Putstsolanovaya aktivnost' mineral'nykh dobavok dlya gidrotehnicheskikh betonov // Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2022. T. 29. №3. S. 250 – 260.
8. Nguyen Binh Ha, Le Ba Danh, Pham Duy Hoa, & Nguyen Ngoc Tuyen, Research on the Application of Geopolymer Concrete for Prestressed Girder Structures of Bridges Towards Sustainable Development, // International Journal of GEOMATE, Vol. 25, Issue 110, 2023, pp. 21–28.
9. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of civil engineering. 2020. № 1 (93). S. 27-34.
10. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // Advances in civil engineering materials. 2019. № 3. S. 153-172.
11. Kherraf L., Abdelouhed A., Belachia M., Hebhou H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // International review of civil engineering. 2018. № 1(9). S. 31-39.
12. Urkhanova L.A., Ivanov A.I., Lkhasaranov S.A. Hydraulic Engineering concrete based on a Composite Binder using dispersed perlite and a colloidal additive// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/ 2025/ Issue 1. Volume 21. PP. 69-78.
13. Urkhanova L.A. Saidova, Z.; Yakovlev, G.; Orbán, Z.; Grakhov, V. Cement Compositions Modified with Dispersed Magnesium Silicate Dihydrate- and Carbon-Based Additives // Construction Materials. – 2022. №2. RR. 101-113. <https://doi.org/10.3390/constrmater2020008>
14. Tang L.V., Nguyen Z.CH., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Stroitel'nyye materialy s nizkim uglerodnym sledom s ispol'zovaniyem promyshlennykh otkhodov //Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. 2025. t. 17. № 1. s. 83-94
15. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23, C. 2642–2657. DOI10.1016/j.jmrt.2023.01.179
16. Fediuk R., Makarova N., Kozin A., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Nanomodified Basalt Fiber Cement Composite with Bottom Ash // Journal of Composites Science, 2023, 7(3), 96. DOI: 10.3390/jcs7030096
17. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Bur'yanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikatsiya tsementnykh betonov mnogosloynymi uglerodnymi nanotrubkami// Stroitel'nyye materialy. 2011. № 2. S.47-51.
18. M. B. Kaddo, Yu.S. Filimonova Hydrophysical properties of heavy-duty concrete with a complex modifier for hydromeliorative construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 20(4) 72–80 (2024). DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-72-80>
19. Tkach Ye.V., Temirkanov R. I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilicon together with micro-reinforcing fiber to improve performance // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2021. – Vol. 332. – No. 5. – P. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3204

20. Rauza Serova, Evgeniya Stasilovich, Yedil Imanov, Tatyana Bogoyavlenskaya, Maksim Khan, Tkach Ye.V. Modified aerated concrete based on man-made waste // International Journal of GEOMATE, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.131-138 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2022.97.3334>
21. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method // Journal of sol-gel science and technology. 2019. № 3. S. 820-829.
22. Kalmagambetova A.Sh., Bogoyavlenskaya T.A., Effekt of physical of samplec on the mechanical charakterictiks, An International Journal "Advances in Materials Research", Vol. 10, No. 1, 2021, pp. 67-76.
23. Dovgan' I.V. Topologicheskiye aspekty strukturoobrazovaniya v dispersnykh sistemakh i vyu-zhushchikh materialakh / I.V. Dovgan', A.V. Kolesnikov, S.V. Semenova, G.A. Kirilenko // Stroitel'nyye materialy. 2011. №3. S.100-102.
24. Korolev Ye.V. Kompozitsionnyye materialy kak polidispersnyye sistemy. Effektivnyye modeli / Ye. V. Korolev, A. N. Grishina, A. M. Ayzenshtadt // Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. – 2021. – № 3(48). – S. 16.

Информация об авторах

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Филимонова Юлия Сергеевна

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия
канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского и подземного строительства,
E-mail: JuliaS06@mail.ru

Черных Александра Александровна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
студент группы 4-81 кафедры градостроительства.
E-mail: ChernyhAA@gic.mgsu.ru

Information about authors

Tkach Evgeniya VI.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor in the Department of Urban Planning.
Email: ev_tkach@mail.ru

Filimonova Yulia S.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
PhD in Engineering Sciences, Associate Professor in the Department of Industrial, Civil, and Underground Construction,
Email: JuliaS06@mail.ru

Chernykh Alexandra A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student in Group 4-81 in the Department of Urban Planning.
Email: ChernyhAA@gic.mgsu.ru

Статья поступила в редакцию 30.10.2025
Одобрена после рецензирования 23.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 30.10.2025
Approved after reviewing 23.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 77.
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор М.А. Амелина
Компьютерная верстка М.А. Амелина

Подписано в печать 08.12.2025 г.
Дата выхода в свет _____.2025 г.
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ № ____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95.