

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель

Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,
ПГУАС

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

Главная редакция:

Б.М. Гришин (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный
секретарь)

Редактор М.А. Сухова

Корректор Н.В. Кучина

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован

в Федеральной службе по надзору
за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации

ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

36946 в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов
несут ответственность за достоверность
приведенных сведений, точность данных
по цитируемой литературе и за исполь-
зование в статьях данных, не подлежа-
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи
в порядке обсуждения, не разделяя точку
зрения автора.

Подписано к печати 1.06.2026.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 24,25. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 49.

Дата выхода в свет 8.06.2026.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

2(67)/2026

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

Ковальчук В.С., Кашурин Р.Р.,

Королев Е.В.

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ

ТАМПОНАЖНЫХ ЦЕМЕНТОВ

С УГЛЕРОДНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ..... 5

Береговой В.А., Лавров И.Ю.,

Семилетков А.В.

МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ

НА ОСНОВЕ КАУСТИЧЕСКОГО ДОЛОМИТА

ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ

МАТЕРИАЛОВ 16

Логанина В.И., Зайцева М.А.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ

ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

НА ПРОЧНОСТЬ ИЗВЕСТКОВЫХ

ПОКРЫТИЙ 25

Перекусихина А.Н., Гарькина И.А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ

ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНЕННЫХ

ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ:

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ

ПОДХОД 30

Абдрахимов В.З.

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА

НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

И ПОРИСТОСТЬ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

НА ОСНОВЕ ЖИДКОСТЕКЛЬНОЙ

КОМПОЗИЦИИ 38

Ерошкина Н.А., Коровкин М.О.,

Харнаев А.В., Шульте И.С.

ВЛИЯНИЕ ВИДА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

НА СВОЙСТВА ГЕОПОЛИМЕРНОГО

БЕТОНА 48

Романенко И.И., Петровнина И.Н.,

Романенко М.И.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ

РЕСУРСОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА

БЕТОНОВ 58

© Авторы публикаций, 2026

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2026

© ПГУАС, 2026

Кузина В.В., Гвоздева О.М., Кошев А.Н. ПАРАМЕТРЫ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНИСТОГО КАТОДА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РАВНОМЕРНОЕ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА 65	Колесников Н.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О., Меркушов А.В. УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СТОЕЧНО-БАЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ДЕРЕВЯННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ КРЕСТООБРАЗНЫХ ПЛАСТИНАХ 132
Москвин Р.Н., Белякова Е.А., Родин В.С. МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ 72	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 140
Симонова И.Н., Бойко А.В. НИЗКОУГЛЕРОДНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ОСНОВА ПЕРЕХОДА К «ЗЕЛЕНОМУ» СТРОИТЕЛЬСТВУ В РОССИИ 77	Гришин Б.М., Бикунова М.В., Салмин С.М., Янюшкин Д.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКРУЖНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА В ВИХРЕВОМ НАПОРНОМ СМЕСИТЕЛЕ ВОДООЧИСТНОЙ СТАНЦИИ 140
Низина Т.А., Низин Д.Р., Чибулаев И.А., Лукачевская И.Г. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УМЕРЕННОГО, СУБТРОПИЧЕСКОГО, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО И АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТОВ 84	Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Агафонов Р.В., Писаренко К.В., Жукова В.П. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА КОЖУХОТРУБНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ 148
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 97	АРХИТЕКТУРА 159
Шенин А.И., Быков А.Н. ПЕРЕКРЕСТНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗЕЙ С ГИДРОЦИЛИНДРАМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРКАСОВ 97	Третьякова О.В., Пронина В.А. ЗДАНИЯ ИЗ СЛТ-ПАНЕЛЕЙ: АРХИТЕКТУРНЫЕ ФОРМЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ 159
Береговой А.М., Присевка А.С. СТАДИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 109	Лапшина Е.Г., Ефимова Т.Б. АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВЕТСКИХ ПАРКОВ 168
Гречишкин А.В., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ 115	Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Исаметдинов С.А. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ: АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА И РАЗРАБОТКА ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ 179
Снежкина О.В., Корнюхин А.В. ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ 124	Герасимов В.П. АРХИТЕКТУРНО-ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО ТРУБОЧНОГО ЗАВОДА В ПЕНЗЕ 187

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Nizin D.R., Nizina T.A., Chibulaev I.A., Lukachevskaya I.G. DURABILITY OF POLYMER MATERIALS: COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ACTINOMETRIC PARAMETERS OF TEMPERATE, SUBTROPICAL, EXTREMELY COLD AND ARCTIC CLIMATES	84
Kovalchuk V.S., Kashurin R.R., Korolev E.V. KINETICS OF STRENGTH DEVELOPMENT IN GROUTING CEMENTS WITH CARBON MODIFIERS	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	97
Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu., Semiletkov A.V. MAGNESITE BINDERS BASED ON CAUSTIC DOLOMITE FOR SPECIAL-PURPOSE BUILDING MATERIALS	16	Shein A.I., Bykov A.N. CROSS-LINKAGE SYSTEMS WITH HYDROCYLINDERS FOR PROTECTING REINFORCED CONCRETE INDUSTRIAL FRAMES	97
Loganina V.I., Zaytseva M.A. THE INFLUENCE OF SURFACE ENERGY OF DISPERSED FILLERS ON THE STRENGTH OF LIME COATINGS.....	25	Beregovoy A.M., Prisevka A.S. STAGES OF THERMAL DEGRADATION OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES AND WALL MATERIALS	109
Perekusikhina A.N., Garkina I.A. PREDICTING THE STRENGTH PROPERTIES OF FILLED EPOXY BINDERS: AN EXPERIMENTAL-STATISTICAL APPROACH	30	Grechishkin A.V., Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. METHOD OF CALCULATING SOUND FIELD CHARACTERISTICS IN INDUSTRIAL BUILDINGS.....	115
Abdrakhimov V.Z. INFLUENCE OF METALLURGICAL SLAG ON TECHNICAL INDICATORS AND POROSITY OF POROUS FILLER BASED ON LIQUID GLASS COMPOSITION	38	Snezhkina O.V., Korniyukhin A.V. EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE ZONE OF ACTION OF TRANSVERSE FORCES	124
Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Kharnaev A.V., Shulte I.S. THE INFLUENCE OF COARSE AGGREGATE ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE	48	Kolesnikov N.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Merkushov A.V. NODAL JOINTS OF A RACK-AND-BEAM SYSTEM WITH WOODEN ELEMENTS ON GLUED STEEL CRUCIFORM PLATES.....	132
Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Romanenko M.I. COMPOSITES ON THE BASIS OF RECOVERABLE RECOURCES FOR CONCRETE PRODUCTION	58	ENGINEERING SYSTEMS.....	140
Kuzina V.V., Gvozdeva O.M., Koshev A.N. CALCULATION OF PARAMETERS OF CARBON FIBER CATHODE PROVIDING UNIFORM METAL COATING OF COMPOSITE MATERIAL	65	Grishin B.M., Bikunova M.V., Salmin S.M., Yanyushkin D.A. DETERMINATION OF CIRCUMFERENTIAL FLOW VELOCITIES IN A VORTEX PRESSURE MIXER OF A WATER TREATMENT STATION	140
Moskvin R.N., Belyakova E.A., Rodin V.S. FROST RESISTANCE OF CONCRETE BASED ON MINERAL-SLAG BINDERS	72	Pavlov M.V., Karpov D.F., Agafonov R.V., Pisarenko K.V., Zhukova V.P. SELECTION OF SHELL-AND-TUBE HEATER SIZE FOR DOMESTIC HOT WATER SYSTEM BASED ON AN OPTIMIZATION PROBLEM.....	148
Simonova I.N., Boyko A.V. LOW-CARBON BUILDING MATERIALS ARE THE BASIS OF THE TRANSITION TO "GREEN" CONSTRUCTION IN RUSSIA	77		

ARCHITECTURE.....159

Tretiakova O.V., Pronina V.A.
BUILDINGS OF CLT PANELS:
ARCHITECTURAL FORMS AND
STRUCTURAL SYSTEMS 159

Lapshina E.G., Efimova T.B.
ARCHITECTURAL AND PLANNING
FEATURES OF SOVIET PARKS 168

**Derina M.A., Petryanina L.N.,
Isametdinov S.A.**
URBAN DETERIORATION
RECONSTRUCTION OPTIMIZATION:
PHYSICAL ANALYSIS AND
DEVELOPMENT OF SPATIAL PLANNING
SOLUTIONS 179

Gerasimov V.P.
ARCHITECTURAL AND HISTORICAL
REVITALIZATION OF INDUSTRIAL
FACILITIES ON THE SITE OF A FORMER
PIPE FACTORY IN PENZA..... 187

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.535

DOI 10.54734/20722958_2026_2_5

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет*
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
ул. Вторая Красноармейская, д. 4,
тел.: +7 (812) 316-53-11

Ковальчук Влада Станиславовна,
соискатель

E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной деятельности,
зав. кафедрой «Технология строительных
материалов и метрология»

E-mail: korolev@nocnt.ru

*ООО «Национальная Пожарная
Компания»*

Россия, 196084, Санкт-Петербург,
ул. Заставская, д. 21-1А

Кашурин Руслан Романович,
кандидат технических наук,
главный инженер

E-mail: woodsrk@list.ru

*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.,
tel: +7 (812) 316-53-11

Kovalchuk Vlada Stanislavovna,
Applicant

E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
Scientific Work, Head of the of the
Department «Technology of Construction
Materials and Metrology»

E-mail: korolev@nocnt.ru

National Fire Company LLC

Russia, 196084, St. Petersburg, 21-1А,
Zastavskaya St.

Kashurin Ruslan Romanovich,
Candidate of Sciences, Chief Engineer

E-mail: woodsrk@list.ru

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ ТАМПОНАЖНЫХ ЦЕМЕНТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

В.С. Ковальчук, Р.Р. Кашурин, Е.В. Королев

Представлены результаты исследования влияния количества графита, окисленного графита и технического углерода на прочность цементного камня из тампонажного цемента. Установлено, что введение этих добавок приводит к увеличению его прочности на $(57 \pm 5 \%)$. Показано, что для прогноза набора прочности тампонажного цементного камня целесообразно использовать логарифмическую модель, а для исследования его структурообразования применять экспоненциальную зависимость набора прочности.

Ключевые слова: прочность, цементный камень, прогнозирование набора прочности, тампонажный цемент, строительство скважин, углеродная добавка, показатели структурообразования

KINETICS OF STRENGTH DEVELOPMENT IN GROUTING CEMENTS WITH CARBON MODIFIERS

V.S. Kovalchuk, R.R. Kashurin, E.V. Korolev

The results of a study examining the influence of graphite, oxidized graphite, and carbon black on the strength of cement stone from grouting cement are presented. It is found that the introduction of these additives leads to an increase in its strength by 57 ± 5 %. It is shown that a logarithmic model is appropriate for predicting the strength gain of casing cement stone, while an exponential strength gain relationship should be used to study its structure formation.

Keywords: strength, cement stone, strength gain prediction, grouting cement, well construction, carbon additive, structure formation indicators

Введение. Прочность цементного камня – базовое свойство, с помощью которого можно проводить оценку уровня качества¹ его структуры, сформировавшейся в заданных рецептурных, технологических и/или эксплуатационных условиях. Одним из современных методов, позволяющих развить научные представления о структурообразовании цементного камня и осуществлять прогноз величины его прочности, является моделирование. Результаты моделирования кроме научной ценности имеют практическую значимость в части проектирования составов цементных материалов.

В настоящее время в распоряжении исследователей имеются различные по детализации модели прочности цементного камня или бетона, предложенные Р. Фере, А.П. Ребиндером, Д. Абрамсом, М.З. Симоновым, В.И. Соломатовым, Н.П. Блещиком, В.В. Бабковым, А.Н. Бобрышевым, Г.В. Несветаевым, Н.М. Беляевым, Н.И. Бальшиным, Р. Хейнесом и др. [1-3]. Эти формулы², как правило, содержат коэффициенты, величины которых получают из экспериментальных исследований.

Для оценки кинетики набора прочности композиционных материалов, содержащих минеральные вяжущие вещества, предложено несколько зависимостей. Наиболее распространённое уравнение набора прочности имеет вид [4]:

$$R(t) = a + b \cdot \ln(t), \quad (1)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты.

Ценность этой зависимости заключается в констатации факта экспоненциального снижения скорости формирования (набора) прочности, а также в универсальности, которая состоит в возможности её применения для любых материалов.

В статье [5] рассматривается процесс структурообразования, количественной характеристикой которого является величина прочности, как двухстадийный процесс, описываемый формулой

$$R(t) = R(0) \left(1 - e^{-ibt^a}\right) + qd \ln\left(\frac{t}{t_{fs}}\right), \quad (2)$$

где $R(0)$ – начальная прочность; t_{fs} – время начала упрочнения первичной структуры; b, a, q, d – эмпирические коэффициенты, зависящие от различных факторов.

Особенностью представлений о структурообразовании, отражённых в формуле (2), является наличие этапа формирования первичной структуры (второе слагаемое формулы (2)) с прочностью $R(t_{fs})$. Далее происходит упрочнение этой структуры с убывающей скоростью до достижения максимальной прочности материала.

¹ Под «уровнем качества структуры» понимается степень приближения к максимальным значениям прочности единичной связи и объёмной плотности связей, определяющих прочность материала.

² Часто это «рецептурные» зависимости влияния вида и количества компонента на прочность материала.

Вариант, основанный на формуле (2), но обладающий преимуществами в части уменьшения количества эмпирических коэффициентов, а также позволяющий произвести оценку структуры материала, был описан в [1, 6]:

$$y(t) = y_m \left(1 - e^{-\alpha t^n}\right), \quad (3)$$

где y_m – предельная величина свойства, характеризующего процесс структурообразования; α, n – коэффициенты.

Важной особенностью указанной модели структурообразования является наличие взаимосвязи между параметром структуры материала, который выражен величиной фрактальной размерности структуры D_{st} , и структурно-чувствительным свойством материала – его прочностью.

Фрактальная размерность структуры материала рассчитывается с применением коэффициента n , который фактически соответствует показателю Хёрста H [4, 6]:

$$D_{st} = 2n + 1, \quad (4)$$

В работе [7] авторы представили формулу расчёта прочности цементного камня от времени в виде:

$$R(t) = \frac{1,12t}{t + K} \cdot R_{28}, \quad (5)$$

где $R(t)$ – прочность цементного камня при времени $t = 0 \dots 90$ суток; R_{28} – прочность цементного камня, достигаемая к 28 суткам при твердении в нормальных условиях.

Большое количество разных внешних и внутренних факторов, которые исследователи предлагают учитывать, приводит к появлению разнообразных математических моделей, основанных на полуэмпирических данных. Модели набора прочности для тампонажных смесей основаны на теории строительного материаловедения, но модифицированы для каждого состава индивидуально. Это является очевидным следствием имеющихся особенностей тампонажных цементов.

Одним из эффективных способов управления структурообразованием композиционных строительных материалов является введение минеральных и химических добавок. Доказано, что для цементных материалов перспективными являются углеродные добавки (УД) [8-18]. Влияние углеродных добавок на прочность цементных материалов зависит от их структуры, геометрических характеристик, концентрации и вида поверхностно-активного вещества, обеспечивающего однородное распределение частиц углеродной добавки в воде (среда-носитель) [8-10]. Общая информация о влиянии некоторых УД на прочность цементного камня и бетона представлена в табл. 1. Поверхностно-активные вещества применяются при мокром способе введения таких гидрофобных добавок, в [11, 12] рассмотрен сухой способ. Для этого авторами предложено использовать аппарат вихревого слоя.

Представленные в табл. 1 данные демонстрируют широкие диапазоны варьирования как видов применяемых добавок, так и их геометрических размеров и концентраций, при которых наблюдается максимальная прочность материала. Кроме того, основным вяжущим веществом, для модифицирования которого использовались указанные добавки, являлся портландцемент. По сравнению с удельной поверхностью тампонажных цементов, которая варьируется в пределах 250...370 м²/кг (по ГОСТ 1581–2019 показатель не нормируется), все представленные углеродные добавки обладают во много раз большей площадью поверхности и могут являться центрами кристаллизации для продуктов гидратации, что закономерно увеличивает их общее количество, а также влияет на скорость набора прочности цементного камня.

Общая информация о влиянии некоторых углеродных добавок¹ на прочность цементного камня и бетона [13-18]

Тип / название добавки	Размер, мкм	Удельная поверхность, м ² /г	Концентрация, % от массы вяжущего	Вид материала	Возраст, сут	Диапазон прочности, %
Технический углерод	0,1-50	10...20	10...10 ⁻¹	ПЦ	3	-50...+30
			10 ⁻¹ ...10 ²	Б	28	-25...+10
Графит	20-150	1...20	10 ⁻¹ ...10 ⁻²	ТЦ	14	0...+45
			10 ⁻¹ ...10 ²	Б	28	-90...-50
Окисленный графит	50-300	50...400	10 ⁻¹ ...10 ⁻²	ТЦ	7	+60...+14 5
			10 ⁻¹ ...10 ⁻²	Б	28	0...+10

Примечание. ПЦ – портландцемент, ТЦ – тампонажный цемент; ЦК – цементный камень, Б – бетон; знак «-» – снижение прочности; знак «+» – увеличение прочности по сравнению с контрольным составом.

Целью данной работы является получение и анализ экспериментальных данных, а также обоснование вида зависимостей, применяемых для описания влияния вида и концентрации углеродных добавок на величину и набор прочности цементного камня на основе тампонажного цемента.

1. Материалы и методы. В работе использован тампонажный цемент марки ПЦТ-I-50. В соответствии с ГОСТ 1581-2019 состав клинкера цементов ПЦТ не нормируется. Выбранный тампонажный цемент имеет следующий минералогический состав, %: C₃S – 65 ± 2,0; C₂S – 10 ± 0,5; C₃A – 6 ± 0,5; C₄AF – 13 ± 0,5.

В качестве углеродных добавок выбраны графит литейный ГЛ-1 (Г), графит окисленный терморасширяющийся EG350-80 (ОГ) и углерод технический П-803 (ТУ). Химический состав указанных углеродных добавок достаточно однороден: С – 99,00 %; Si – 0,22...0,64; Al – 0,13...0,28; Fe – 0,01...0,02; Ca – 0,02...0,14; S – 0,01...0,32.

Пробоподготовка и определение прочности на сжатие образцов проводились согласно ГОСТ 34532-2019 через 1; 2; 3; 7 и 10 суток.

2. Результаты и их обсуждение. Влияние концентрации выбранных углеродных добавок на прочность тампонажного цементного камня (ТЦК) в возрасте 10 суток (В/Ц = 0,5) представлено на рис. 1.

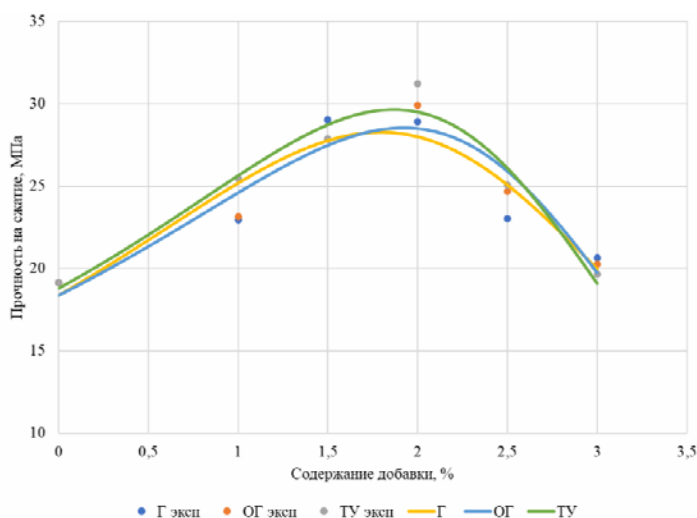


Рис. 1. Зависимость прочности ТЦК от содержания углеродной добавки

¹ Далее добавки, представленные в табл. 1, использованы как объекты исследования, а данные по концентрации добавок и прочности цементных материалов – для сопоставления с результатами авторов данной работы.

Кинетику набора прочности ТЦК, модифицированного углеродными добавками, исследовали на составах, содержащих 2 % добавки от массы тампонажного цемента (рис. 2).

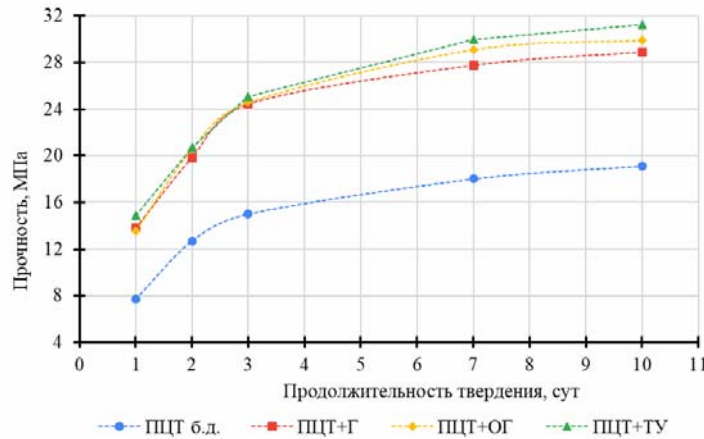


Рис. 2. Зависимость прочности ТЦК от продолжительности твердения

2.1. Концентрационные зависимости прочности ТЦК. Представленные на рис. 1 экспериментальные данные демонстрируют несколько важных результатов:

1) Вид добавки не имеет статистически значимого влияния на экстремальный характер зависимости прочности цементного камня от концентрации углеродных добавок $R_{цк} = f(C_d)$. Для всех добавок максимум прочности цементного камня наблюдается при концентрации добавок 2 % от массы тампонажного цемента. Максимальное увеличение прочности составляет (57 ± 5) %, что сопоставимо с данными, представленными в табл. 1.

2) Вид зависимости $R_{цк} = f(C_d)$ описывается функцией

$$R_{цк} = \frac{a + b \cdot C_d}{1 + c \cdot C_d + d \cdot C_d^2} \quad (6)$$

(где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, величины которых представлены в табл. 2), характерной для концентрационных зависимостей прочности композиционных материалов [1].

Т а б л и ц а 2

Эмпирические коэффициенты $R_{цк} = f(C_d)$

Обозначение добавки	Эмпирические коэффициенты			
	a	b	c	d
Г	18,34	-2,53	-0,48	0,11
ОГ	18,34	-3,73	-0,50	0,10
ТУ	18,79	-3,85	-0,52	0,11

Анализ эмпирических коэффициентов (см. табл. 2) показывает, что влияние каждой добавки идентично, но имеет особенности, которые заключаются в следующем. При введении графита (Г) его негативное влияние на конструктивный процесс формирования прочности¹ (числитель зависимости $R_{цк} = f(C_d)$) наименьшее: абсолютная величина коэффициента b минимальна; негативное влияние окисленного графита и технического углерода на конструктивный процесс максимально. Однако величины деструктивного процесса формирования прочности (знаменатель зависимости

¹ В соответствии с феноменологической моделью формирования прочности [19].

$R_{цк} = f(C_d)$) для окисленного графита и технического углерода минимальны, а для графита – максимальна (абсолютное значение коэффициента c минимально). С учётом более весомого вклада в формирование прочности деструктивного процесса необходимо признать перспективными добавки из окисленного графита или технического углерода. Выбор из этих добавок зависит только от экономического обоснования. Кроме того, анализ полученных концентрационных зависимостей $R_{цк} = f(C_d)$ показывает, что коэффициенты их асимметричности имеют следующие значения:

- при введении графита – $S_w = -0,37$;
- при введении окисленного графита – $S_w = -0,31$;
- при введении технического углерода – $S_w = -0,28$.

Это указывает на смещение максимума прочности в область более высоких концентраций добавки.

2.2. Кинетические зависимости прочности ТЦК (см. рис. 2). Существует ряд моделей набора прочности цементных материалов (в основном бетона), которые с удовлетворительной точностью характеризуют процесс его твердения. К основным проблемами подбора математических моделей, описывающих процесс твердения цементных материалов, относятся:

- 1) недостаточная точность при верификации данных в сравнении с результатами лабораторных исследований;
- 2) ограниченная применимость на начальном и завершающем этапах гидратации цемента [4-7, 20];
- 3) существующие модели применяются только для определённого состава материала.

В данной работе приведены обоснование выбора модели набора прочности ТЦК, пригодной для практического применения, а также оценка эффективности использования формулы (3) для анализа структурообразования ТЦК. Выбор модели набора прочности ТЦК проводили из моделей, представленных формулами (1) и (5). Дополнительно была выполнена оценка целесообразности модификации формулы (1), направленной на повышение точности прогнозирования прочности ТЦК.

По данным рис. 2 значения эмпирических коэффициентов формулы (1) равны:

- для контрольного состава ТЦК: $a = 8,70$, $b = 4,81$;
- для составов ТЦК, модифицированных с углеродными добавками: $a = 15,30 \pm 0,45$, $b = 6,90 \pm 0,25$.

Коэффициент детерминации при использовании формулы (1) варьируется в диапазоне 0,98...0,99. Анализ эмпирических коэффициентов показывает, что скорость набора прочности контрольного состава ТЦК, рассчитываемая по формуле

$$dR / dt = b / t, \quad (7)$$

по сравнению с модифицированными составами меньше на 43,5 %.

Для использования формулы (5) необходимо некоторое её уточнение относительно прочности в максимальный момент времени, что связано с быстрым набором прочности ТЦК. Была использована прочность цементного камня после 10 суток твердения. Для исследуемых составов эмпирические коэффициенты имеют следующие значения:

- для контрольного состава ТЦК: $A = 1,176$; $K = 1,661$;
- для составов ТЦК, модифицированных с углеродными добавками: $A = 1,152 \pm 0,012$; $K = 1,368 \pm 0,047$.

Коэффициент детерминации при использовании формулы (9) для всех составов более 0,994.

Сопоставление формул (1) и (5) показывает, что большее количество экспериментальных данных объясняет формула (5). Однако применение формулы (1) технически

менее сложно, поэтому для практических задач целесообразно использовать логарифмическую формулу кинетики набора прочности ТЦК.

Для оценки эффективности применения формулы (3) для анализа структурообразования тампонажного цементного камня необходимо ввести дополнительные показатели:

1) Относительная площадь границы раздела фаз, формируемая углеродной добавкой:

$$S_{\text{ф, д}} = S_{\text{ф}} / m_{\text{д}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{ф}}$ – общая площадь раздела фаз «углеродная добавка – цементно-водная смесь», $\text{м}^2/\text{м}^3$; $m_{\text{д}}$ – масса углеродной добавки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При равном количестве вводимой добавки величина $S_{\text{ф, д}}$ будет равна удельной поверхности добавки $S_{\text{д}}$.

2) Предположение об ускоряющем действии углеродных добавок [8] позволяет сформулировать показатель, характеризующий вклад поверхности углеродной добавки $S_{\text{ф, д}}$ в формирование прочности на начальном этапе ($R(1)$ – прочность цементного камня на 1-е сутки):

$$K_{RS} = \frac{R(1)}{S_{\text{ф, д}}}. \quad (9)$$

3) Геометрической характеристикой структуры цементного камня является его фрактальная размерность D_{st} , рассчитываемая по формуле (4).

Значения эмпирических коэффициентов формулы (3) и величины показателя структурообразования представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Эмпирические коэффициенты формулы (3) и показатели структурообразования

Состав	Эмпирические коэффициенты		$S_{\text{ф, д}}, \text{м}^2/\text{г}$	$K_{RS}, \text{МПа}\cdot\text{г}/\text{м}^2$	D_{st}
	α	n			
Контрольный	0,521	0,784	–	–	2,57
Г	0,646	0,754	4,0	3,45	2,51
ОГ	0,593	0,927	47,0	0,29	2,85
ТУ	0,597	0,849	16,0	0,93	2,70

Исходя из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1) Наибольшее ускорение структурообразования ТЦК оказывает графит (величина коэффициента α , характеризующего скорость процесса, максимальна). При этом коэффициент n – показатель Хёрста, характеризующий тренд процесса (его персистентность), а также степень замедления процесса, – имеет минимальную величину. Фрактальная размерность структуры цементного камня, сформированного в присутствии графита, минимальна, в том числе по сравнению с цементным камнем контрольного состава. С учётом физической интерпретации фрактальной размерности такая её величина для цементного камня, модифицированного графитом, указывает на формирование цементного камня, для которого количество кристаллов минимального размера по сравнению с контрольным составом меньше. Это позволяет предположить формирование относительно крупнокристаллической структуры цементного камня в присутствии графита. При этом вклад этой добавки в формирование прочности максимален – $K_{RS} = \max$. Минимальная величина $S_{\text{ф, д}}$ предопределяет при прочих равных условиях и минимальное агрегирование частиц графита. Отсюда можно

заклучить, что предположение авторов [8] об ускоряющем действии углеродных добавок справедливо.

2) Скорости структурообразования цементного камня в присутствии технического углерода и окисленного терморасширяющегося графита практически равны, но больше скорости структурообразования цементного камня контрольного состава ($\approx 14\%$), но меньше, чем в присутствии графита. Однако показатели структурообразования существенно различаются. Поверхностная активность добавок в совокупности с высокими их удельными поверхностями, способствующими агрегированию частиц, приводит к увеличению количества кристаллов продуктов гидратации тампонажного цемента минимального размера, что и демонстрируют величины фрактальной размерности структуры цементного камня. Причём чем выше $S_{ф,д}$, тем больше значение D_{st} и меньше показатель K_{RS} (вследствие практически равных величин прочности цементного камня на 1-е сутки твердения).

Таким образом, формула (3) и показатели структурообразования, определение которых требует минимальных дополнительных сведений о применяемых добавках, расширяют возможности исследователей. В частности, позволяют спрогнозировать маршрут эволюции структуры цементного камня в присутствии различных добавок. В частности, при введении графита наблюдается укрупнение элементов структуры цементного камня, а при введении ОГ и ТУ – блокирование частицами добавок роста кристаллов продуктов гидратации тампонажного цемента. Отсюда следуют дополнительные задачи для последующих экспериментальных исследований особенностей структуры и прочности тампонажного цементного камня с различными добавками.

Заклучение. Полученные экспериментальные данные показывают, что введение углеродных добавок – графита, окисленного графита и технического углерода – приводит к повышению прочности цементного камня из тампонажного цемента. Для всех добавок максимум прочности цементного камня наблюдается при концентрации добавок 2 % от массы тампонажного цемента. Максимальное увеличение прочности составляет $(57\pm 5)\%$. Анализ эмпирических зависимостей прочности цементного камня от концентрации добавок показывает, что перспективными добавками являются окисленный графит или технический углерод. Вследствие практически равного влияния добавок на прочность цементного камня окончательный выбор углеродной добавки зависит только от экономического обоснования.

Обзор литературы показал, что существующие математические модели процесса набора прочности цементного камня имеют ограниченную применимость по отношению к материалам из тампонажного цемента. Для практических целей целесообразно использовать логарифмическую модель набора прочности цементного камня на основе тампонажного цемента. Применение формулы (3) позволяет спрогнозировать маршрут эволюции структуры цементного камня в присутствии различных добавок, а также обосновать дополнительные экспериментальные исследования структуры и прочности тампонажного цементного камня.

Список литературы

1. Королев, Е.В. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.09.18-27 // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 9. – С. 18–27.
2. Суходоева, Н.В. Методика проектирования состава бетона / Н.В. Суходоева, В.В. Бабицкий. – DOI 10.53078/20778481_2009_2_167 // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2009. – № 2 (23). – С. 167–176.
3. Kravchenko, V. A modelling framework of portland cement hydration / V. Kravchenko. – DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-45-52 // Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences. – 2024. – № 1 (36). – P. 45–52.

4. Иноземцев, А.С. Высокопрочные лёгкие бетоны / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – С. 192.
5. Поспелова, Е.А. Анализ процессов производства и применения строительных материалов на основе теории переноса / Е.А. Поспелова, Ш.М. Рахимбаев. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 163.
6. Воронов, П.В. Оценка кинетики фазовых переходов в твердеющих гетерогенных материалах / П.В. Воронов, А.Н. Бобрышев, А.В. Лахно [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 58–66.
7. Титаев, В.А. Прогнозирование прочности бетона на основе данных температурного контроля / В.А. Титаев, Ю.Д. Сосин // Технологии бетонов. – 2007. – № 3 (14). – С. 66–67.
8. Luo, T. Effects of Graphite on Electrically Conductive Cementitious Composite Properties: A Review / T. Luo, Q. Wang. – DOI: 10.3390/ma14174798 // Materials. – 2021. – Vol. 14 (17). – Article number: 4798.
9. Zhang, X. Graphite-reinforced Portland cement composites at alternate ultra-high temperatures / X. Zhang, X. Zhang, Y. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.039 // Powder Technology. – 2020. – 378. – P. 647–658.
10. Zhang, Q. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives / Q. Zhang, C. Luan, C. Yu [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 346 (1). – Article number: 128455.
11. Ushkov, V. Repair mortars obtained by plasma modification and vortex activation / V. Ushkov, R. Ibragimov, O. Figovsky, S. Samchenko. – DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-4-60-69 // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7 (4). – P. 60–69.
12. Ибрагимов, Р.А. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королёв. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41 // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 1. – С. 35–41.
13. Cai, J. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature / J. Cai, M. Wang, S. Zhou, X. Cheng. – DOI: 10.1021/acsomega.2c00717 // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7 (16). – P. 14148–14159.
14. Li, M. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement / M. Li, F. Meng, X.Y. Guo. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445 // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 847. – P. 445–450.
15. Qian, Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives / Z. Qian, C. Luan, C. Yu [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 346. – Article number: 128455.
16. Jeyashree, T.M. Experimental studies on concrete elements using waste carbon black as filler material / T.M. Jeyashree, G. Chitra // Asian Journal of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 21–30.
17. Wu, S.P. Study on Mechanical and Thermal Properties of Graphite Modified Cement Concrete / S.P. Wu, P. Wang, B. Li [et al.]. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.599.84 // Key Engineering Materials. – 2014. – 599. – P. 84–88.
18. Селезнёва, О.И. Высокоэффективный тяжелый бетон с использованием углеродсодержащего модификатора / О.И. Селезнёва, В.С. Орлов, П.А. Шустов. – DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-654-661 // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 654–661.
19. Гришина, А.Н. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения / А.Н. Гришина, Е.В. Королёв. – Москва : МГСУ, 2015. – 224 с.
20. Hu, D. Hydration of Early-Age Composite Cement Paste Using Low-Field Nuclear Magnetic Resonance / D. Hu, N. Hu, S. Ben [et al.]. – DOI 10.1155/2024/1003479 // Advances in Civil Engineering. – 2024. – Article number: 1003479.

References

1. Korolev, E.V. Systematic Analysis of the Evolution of Knowledge About the Structure Formation of Building Materials / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Danilov, A.M. Ayzenshtadt. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.09.18-27 // *Industrial and Civil Engineering*. – 2024. – No. 9. – P. 18–27.
2. Sukhadoeva, N.V. Technique of concrete structure designing / N.V. Sukhadoeva, V.V. Babitski. – DOI 10.53078/20778481_2009_2_167// *Belarusian-Russian University Bulletin*. – 2009. – No. 2 (23). – P. 167–176.
3. Kravchenko, V. A modelling framework of portland cement hydration / V. Kravchenko. – DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-45-52 // *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences*. – 2024. – № 1 (36). – P. 45–52.
4. Inozemtcev, A.S. High-strength lightweight concretes / A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev. – Saint Petersburg : Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022. – 192 p.
5. Pospelova, E.A. Analysis of the processes of production and application of building materials based on the theory of transfer / E.A. Pospelova, Sh.M. Rakhimbaev. – Belgorod : Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2019. – 163 p.
6. Voronov, P.V. Evaluation of phase transitions kinetics in hardening heterogeneous materials / P.V. Voronov, A.N. Bobryshev, A.V. Lakhno [et al.] // *Regional architecture and engineering*. – 2010. – No. 2. – P. 58–66.
7. Titaev, V.A. Prediction of concrete strength based on temperature control data / V.A. Titaev, Yu.D. Sosin // *Concrete Technologies*. – 2007. – No. 3 (14). – P. 66–67.
8. Luo, T. Effects of Graphite on Electrically Conductive Cementitious Composite Properties: A Review / T. Luo, Q. Wang. – DOI: 10.3390/ma14174798 // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (17). – Article number: 4798.
9. Zhang, X. Graphite-reinforced Portland cement composites at alternate ultra-high temperatures / X. Zhang, X. Zhang, Y. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.039 // *Powder Technology*. – 2020. – 378. – P. 647–658.
10. Zhang, Q. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives / Q. Zhang, C. Luan, C. Yu [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455// *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 346 (1). – Article number: 128455.
11. Ushkov, V. Repair mortars obtained by plasma modification and vortex activation / V. Ushkov, R. Ibragimov, O. Figovsky, S. Samchenko. – DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-4-60-69 // *Architecture and Engineering*. – 2022. – Vol. 7 (4). – P. 60–69.
12. Ibragimov, R.A. Strength of Composites on Portland Cement Modified with Carbon Nano-Tubes and Processed in a Vortex Layer Apparatus / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41 // *Industrial and Civil Engineering*. – 2021. – No. 1. – P. 35–41.
13. Cai, J. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature / J. Cai, M. Wang, S. Zhou, X. Cheng. – DOI: 10.1021/acsomega.2c00717 // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (16). – P. 14148–14159.
14. Li, M. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement / M. Li, F. Meng, X.Y. Guo. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445 // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 847. – P. 445–450.
15. Qian, Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives / Z. Qian, C. Luan, C. Yu [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455 // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 346. – Article number: 128455.
16. Jeyashree, T.M. Experimental studies on concrete elements using waste carbon black as filler material / T.M. Jeyashree, G. Chitra // *Asian Journal of Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 21–30.
17. Wu, S.P. Study on Mechanical and Thermal Properties of Graphite Modified Cement Concrete / S.P. Wu, P. Wang, B. Li [et al.]. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.599.84 // *Key Engineering Materials*. – 2014. – 599. – P. 84–88.

18. Selezneva, O.I. High-performance heavyweight concrete containing carbon modifier / O.I. Selezneva, V.S. Orlov, P.A. Shustov. – DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-654-661// Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. – 2021. – 11(4). – P. 654–661.

19. Grishina, A.N. Liquid glass building materials for special purposes / A.N. Grishina, E.V. Korolev. – Moscow : MGSU, 2015. – 224 p.

20. Hu, D. Hydration of Early-Age Composite Cement Paste Using Low-Field Nuclear Magnetic Resonance / D. Hu, N. Hu, S. Ben [et al.]. – DOI 10.1155/2024/1003479 // Advances in Civil Engineering. – 2024. – Article number: 1003479.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Виталий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Лавров Иван Юрьевич,
ассистент

Семилетков Александр Викторович,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Vitaly Aleksandrovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
department «Building materials and
woodworking technology»

Lavrov Ivan Yurievich,
Assistant

Semiletkov Aleksander Viktorovich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

МАГНЕЗИАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ОСНОВЕ КАУСТИЧЕСКОГО ДОЛОМИТА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А.В. Семилетков

Рассмотрены особенности получения минеральных вяжущих веществ из доломитизированного известняка, содержащего менее 20 % оксида магния. Показано, что технология селективного термоллиза позволяет использовать низкосортные магнийсодержащие горные породы, как минерально-сырьевую базу для получения каустического доломита – высокопрочного воздушного вяжущего вещества, сочетающего экологическую безопасность с ценными строительными свойствами, включающими защитные функции от ионизирующего излучения и стойкость к воздействию высоких температур.

Ключевые слова: доломитизированный известняк, каустический доломит, модификация состава, защитные растворы и бетоны

MAGNESITE BINDERS BASED ON CAUSTIC DOLOMITE FOR SPECIAL-PURPOSE BUILDING MATERIALS

V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, A.V. Semiletkov

The features of obtaining mineral binders from dolomitized limestone containing less than 20 % magnesium oxide are considered. It is shown that the technology of selective thermolysis makes it possible to use low-grade magnesium-containing rocks as a mineral raw material base for producing caustic dolomite, a high-strength air binder that combines environmental safety with valuable building properties, including protective functions against ionizing radiation and resistance to high temperatures.

Keywords: dolomitized limestone, caustic dolomite, composition modification, protective solutions and concretes

Введение. Развитие промышленности и научных исследований в различных отраслях экономики сопровождается интенсивным внедрением технологических процессов, генерирующих широкий спектр электромагнитных излучений. Показательным примером является современная медицина, базирующаяся на повсеместном проникновении в повседневную практику диагностических и лучевых терапевтических аппаратов, эксплуатация которых сопровождается потенциально опасным ионизирующим облучением. Высокотехнологичные медицинские ускорители, используемые в **нейтронозахватной терапии**, работают при энергиях электронов порядка 18...20 МэВ и

являются мощными источниками фотонейтронов, безопасность от воздействия которых обеспечивается методами пассивной защиты с использованием специально разработанных строительных материалов. Иллюстрацией такого подхода является реконструкция радиологического корпуса областного онкологического диспансера г. Пензы с установкой нового медицинского ускорителя, вызвавшая необходимость проектирования стенки первичной защиты 2-метровой толщины из тяжелого бетона средней плотностью 2300 кг/м³.

Критерий безопасности работы персонала соблюдается при различной толщине защитного слоя, лимитируемой плотностью применяемых материалов. При расчете минимальной толщины защиты d от нейтронов плотность материала защиты является важнейшим параметром, определяющим длину пути релаксации пучка

$$d = \alpha \ln K_1, \quad (1)$$

где K_1 – необходимая кратность ослабления; α – длина релаксации (для обычного тяжелого бетона $\alpha \approx 16$ см [1]).

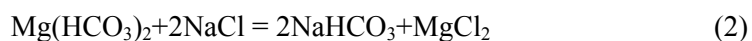
Анализ практики использования защитных составов показывает эффективность применения баритовых композиций с вяжущими на основе магнезиального цемента. По имеющимся данным, магнезиально-баритовые штукатурные смеси с высоким содержанием заполнителя существенно превосходят по своим экранирующим характеристикам цементно-баритовые аналоги: уменьшение толщины эквивалентного защитного слоя составляет 2,5...2,7 раза [1].

Помимо улучшенных защитных качеств магнезиальные вяжущие отличает спектр ценных строительных характеристик, включающий высокие показатели механической прочности, ударной вязкости, адгезии к различным подложкам, термостойкости и минимальной усадки. Негативные аспекты, отмечаемые при их практическом применении, обусловлены воздушным типом твердения и наличием в составе соединений хлора, что затрудняет применение стальной арматуры.

Внедрение магнезиальных бетонов в строительство сталкивается с проблемой удалённости месторождений природного магнезита от промышленного центра страны, а также тем фактом, что основной объем добываемой горной породы идет на удовлетворение потребностей металлургии. Согласно опубликованным данным о рынке магнезиального сырья [2], наиболее массовым продуктом его переработки является «намертво» обожженный магнезит (70...75 %), а выработка каустического магнезита не превышает 25...30 %.

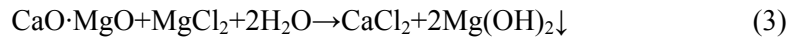
Промышленные запасы магнезита распределены по территории страны крайне неравномерно. Крупные месторождения сосредоточены на Южном Урале, причем доля самого крупного из них (Саткинское, Челябинская область) составляет более 90 % от общей добычи. Несмотря на значительные запасы магнезита, особенности географического расположения привели к тому, что доля импортного MgO превышает 30 %. Это указывает на целесообразность исследований в области технологий переработки местных пород с пониженным содержанием магния для получения магнезиальных вяжущих, соответствующих требованиям современного, в том числе специального, строительства.

В ряде зарубежных стран указанную проблему решают, извлекая бишофит из морской воды. Получение бишофита из океанической воды осуществляют, осаждая Mg(OH)₂ с использованием CaO по реакции (2), а полученную пульпу подвергают последующей карбонизации. В течение данного процесса катионы магния переходят в гидрокарбонат, который в присутствии хлорида натрия подвергается конверсии с образованием раствора хлорида магния [3]



В условиях южных регионов страны перспективно получение Mg(OH)₂ путем переработки магниевой рапы – солевого раствора природных озёр с высокой степенью минерализации. Согласно опубликованным данным [4], в некоторых из них (рапа озера Малого Лиманского Астраханской области) содержание бишофита (MgCl₂·6H₂O)

превышает 84 %. В процессе получения рапу смешивают с обожженным доломитом с последующим отделением образовавшегося осадка

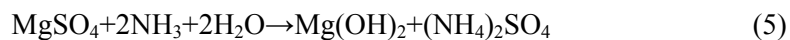


Наряду с MgO, доля которого не превышает 20...22 %, в состав вяжущих, получаемых термолизом низкосортных магнийсодержащих горных пород, входят примеси, проявляющие активность при гидратации. В этой связи интерес представляет подход, связанный с модифицированием магниезиального вяжущего нано- и микроразмерными добавками, полученными направленной кристаллизацией Mg(OH)₂. В работе [5] показан процесс синтеза наночастиц гидроксида магния с заданными морфологическими параметрами: от гексагональных нанопластин до нанотрубок, наностержней и нанолистов, а также смеси нанолистов и наночастиц. Химическая аффинность и развитая поверхность наночастиц формируют потенциал их использования в качестве прекурсоров, регулирующих структурообразующие процессы в рамках гидратации MgO с целью повышения физико-механических свойств затвердевшего магниезиального камня.

К настоящему времени известно несколько лабораторно апробированных способов получения наноструктурированного гидроксида магния – Mg(OH)_{2(н.стр)}, среди которых выделяют микроволновой, гидротермальный и осаждение из раствора [6, 7].

Высокой пористостью обладают наноструктурированные Mg(OH)₂, полученные гидротермальным синтезом смеси MgO и H₂O без поверхностно-активных веществ (ПАВ). Наночастицы имеют гексагональную пластинообразную морфологию и коллоидные размеры (50-110 нм). Отсутствие ПАВ приводит к тому, что пластины агломерируются, образуя сферические частицы с диаметром несколько десятков микрон.

В работе [8] гексагональные нанопластины гидроксида магния получены на базе технической кальцинированной магнезии (MgO), которая взаимодействовала с азотным удобрением ((NH₄)₂SO₄) в присутствии желатина и поливинилового спирта. Роль ПАВ заключалась в предотвращении объединения наночастиц в кластеры. Процесс получения готового продукта описывается уравнениями реакций, протекающих в две последовательные стадии



Как pH, так и концентрация поверхностно-активного вещества оказывают влияние на морфологию синтезированного продукта: без ПАВ и при высоком pH образовывались кластерные структуры друзовидной формы; с ПАВ и при низком pH – отдельные гексагональные пластинки. Гидротермальная обработка приводит к укрупнению гексагональных пластинок.

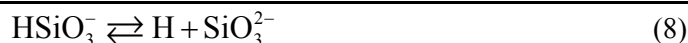
Возможность получения различных форм наночастиц подтверждается работой [9], в которой исследовалось влияние роли противоионов в реагентах, используемых в качестве источников магния (MgCl₂, Mg(NO₃)₂) и осаждающих агентов (NaOH, NH₄OH). При этом гидроксид натрия способствует образованию лучистых агломератов, а водный раствор аммиака – гексагональных пластинок.

Исходя из специфики свойств Mg(OH)_{2(н.стр)}, можно предположить вероятность протекания следующих благоприятных структурообразующих превращений. На первом этапе гидратация диоксида кремния приводит к образованию плохо растворимой метакремниевой кислоты



которая диссоциирует с образованием на поверхности частиц анионов SiO₃⁻





Затем положительно заряженные наночастицы адсорбируются на отрицательно заряженной поверхности SiO_2 за счет притяжения зарядов. Далее адсорбированные $\text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{н.стр})}$, внедряясь в поверхностные слои, нарушают их целостность и формируют метастабильные комплексы с ядром SiO_2 и химически активированной поверхностью. Это приводит к следующему этапу – взаимодействию коллоидного $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и кремнезёма с образованием метасиликатов магния



В свою очередь, наличие химически активированной поверхности создает условия для осуществления низкотемпературного синтеза волокнистых образований аналогичных природному хризотилу.

Этот процесс сопровождается очевидным ростом механических показателей магнезиального камня, как за счет эффекта микрорамирования, так и заполнения его внутренних мезопор водостойкими кристаллами хризотила. При этом представляет научный интерес вопрос о влиянии морфологии $\text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{н.стр})}$ на степень его активности в структурообразующих процессах. Разнообразие типов и форм коллоидного $\text{Mg}(\text{OH})_2$, синтезированного *in vitro*, показано на рис. 1.

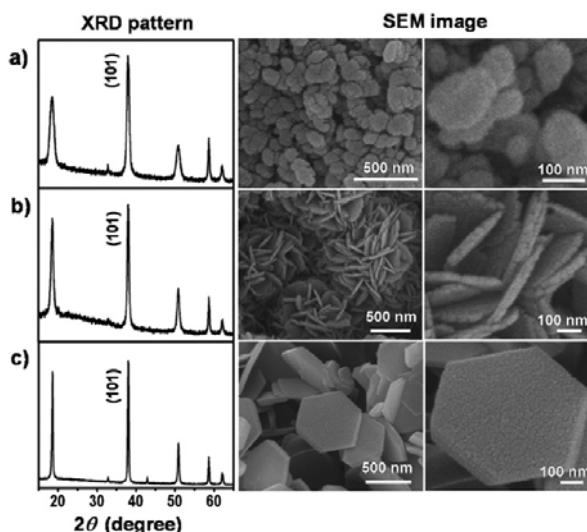


Рис. 1. PXD-схемы и СЭМ-изображения для наночастиц МН, синтезированных из: а – MgCl_2 ; б – MgSO_4 ; в – MgO -предшественников соответственно [10]

Использованные материалы и компоненты. Экспериментальное вяжущее – продукт умеренного обжига доломита (ООО «Иссинский КСМ»). По данным производителя усредненный оксидный состав добываемой горной породы содержит: CO_2 – 45 %, CaO – 30 %, MgO – 20 %.

В качестве эталона сравнения выбрано вяжущее промышленного производства – магнезиальный цемент «МАГцемент» в виде сухой строительной смеси (КМССС). Ее состав включает магнезиальное вяжущее и затворитель – хлористый магний. Для затворения всех составов использовался водный раствор MgCl_2 плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$.

Определение оптимальных режимов обжига. Оптимальная температура обжига сырья зависит от особенностей образования доломита конкретного месторождения. Цель термоллиза заключается в максимизации выхода MgO при минимальном образовании CaO , резко негативно влияющего на прочность вяжущего [12]. Базовый режим температурной обработки включал обжиг при $760 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1,5 часов и последующее охлаждение продукта вместе с печью. Обожженный материал измельчали в лабораторной ножевой мельнице в течение 30 минут для получения однородного порошка вяжущего вещества.

Исследование свойств вяжущего материала. Показатели свойств эталонного материала, определенные в ходе испытаний на экспериментальной установке оригинальной конструкции (рис. 2), показаны на рис. 3.

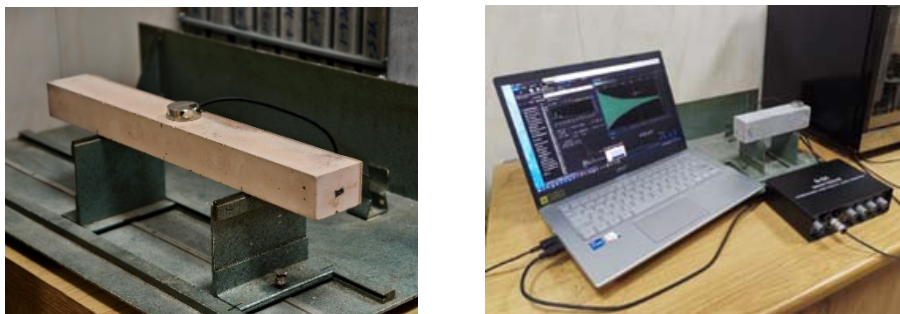


Рис. 2. Установка для определения динамических характеристик магнезиального камня с размещением образца на опорах

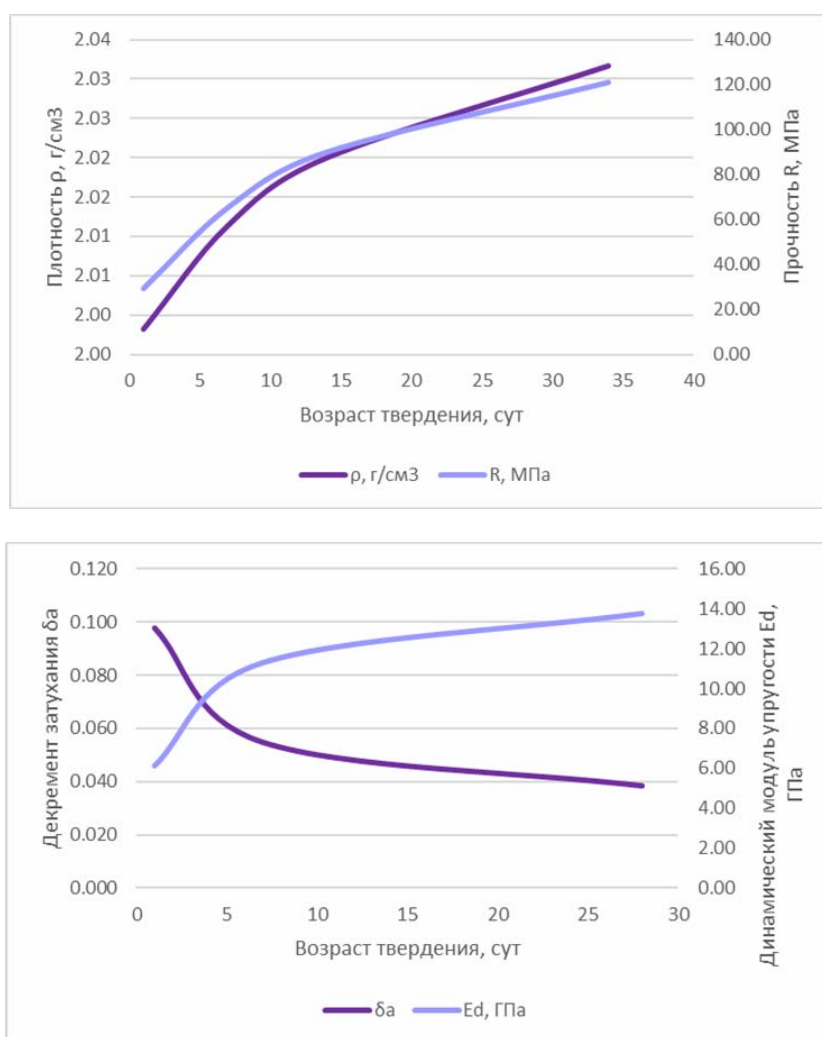
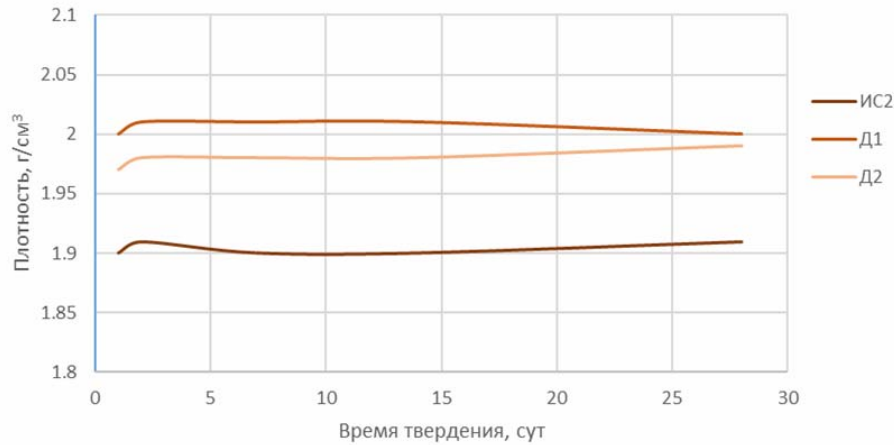


Рис. 3. Показатели свойств магнезиального камня на основе КМССС

Для проектирования технологии переработки проведена оптимизация фракционных параметров подготовки доломитового сырья. Исследовалось влияние температурной обработки доломитового сырья различной гранулометрии на прочностные характеристики образцов. В качестве исходных материалов использовались: доломитовая мука (ИС2); доломитовый щебень фракции 2,5–5 мм (Д1); доломитовый щебень фракции 5–10 мм (Д2). Результаты испытаний приведены на рис. 4.

а



б

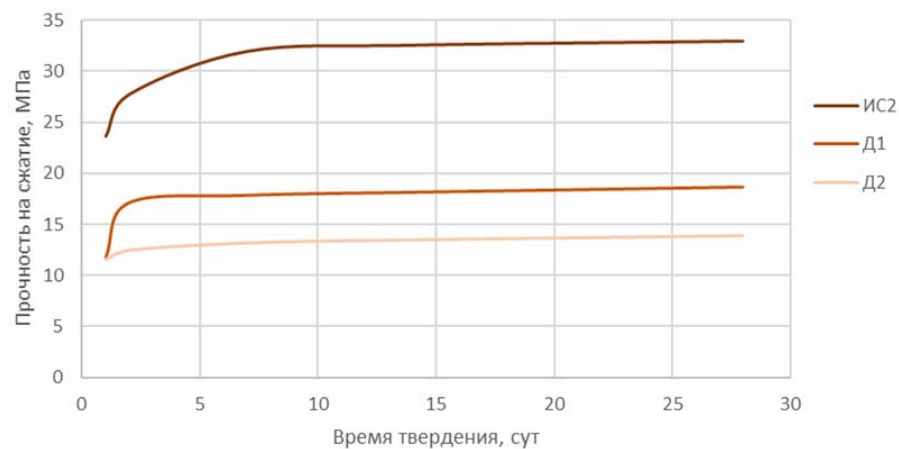


Рис. 4. Влияние фракций на плотность (а) и прочность (б) магниального камня

Анализ полученных данных выявил значительное влияние дисперсности сырья на конечные механические свойства. Наибольшую прочность при сжатии продемонстрировали образцы, полученные из обожженной доломитовой муки. Можно сделать вывод, что уменьшение размера частиц исходного сырья до термообработки положительно коррелирует с повышением прочностных характеристик конечного материала. Это обусловлено более полным и однородным протеканием процессов нагрева и декарбонизации в высокодисперсной массе.

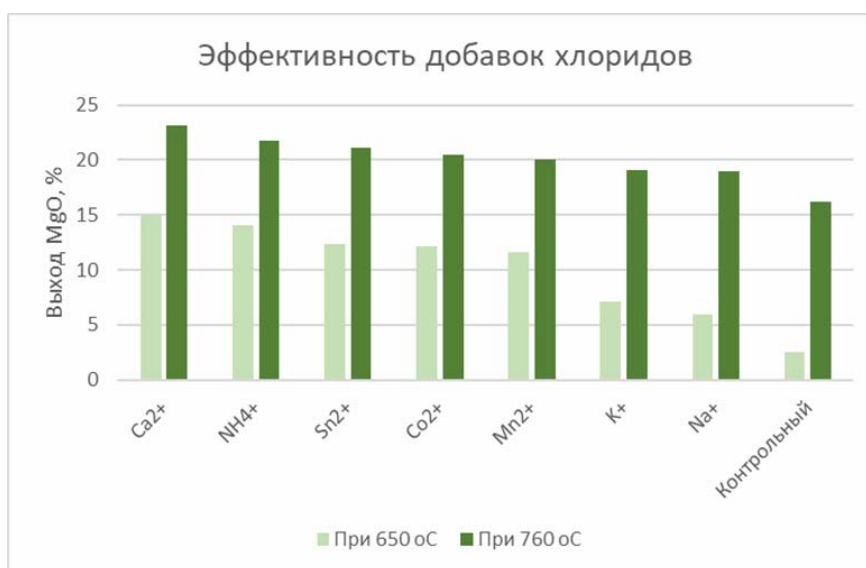
С целью уменьшения энергозатрат исследовалось влияние добавок, интенсифицирующих разложение карбоната магния. Для этого вводили хлорсодержащие добавки, способные активировать процесс разложения карбоната магния, не влияя при этом на CaCO_3 . Ранее подобные исследования проводились с использованием различных неорганических солей [13].

Для решения поставленной задачи проведена оценка каталитической активности неорганических солей хлоридов в процессе термического разложения карбоната магния в структуре доломита. Каталитические добавки на основе хлоридов вводили в доломитовую муку в количестве 2,5 % от массы сырья. Количественные показатели влияния хлоридной добавки и температурного фактора на кинетику декарбонизации, рассчитанные по потере массы навесок, приведены в таблице и на рис. 5.

Наиболее эффективной добавкой является хлорид кальция. Зависимость эффективности добавки от радиуса катиона не наблюдается, а большее значение имеет относительное содержание хлора в сочетании с температурой плавления.

Эффективность добавок-катализаторов термолиза $MgCO_3$

Добавка	Катион	Радиус, пм	Температура расплава, °С	Содержание хлора, %	Выход MgO , % при T, °С	
					650	760
$CaCl_2$	Ca^{2+}	99	772	63,9	15,0	23,2
NH_4Cl	NH_4^+	143	338	66,3	14,1	21,8
$SnCl_2$	Sn^{2+}	93	247	37,4	12,4	21,1
$CoCl_2$	Co^{2+}	72	724	54,7	12,1	20,5
$MnCl_2$	Mn^{2+}	80	650	56,3	11,6	20,1
KCl	K^+	133	776	47,6	7,1	19,0
NaCl	Na^+	97	801	60,7	6,0	19,1
Контрольный	-	-	-	-	2,5	16,2

Рис. 5. Сравнение эффективности добавок-катализаторов термолиза $MgCO_3$

Выводы. Несмотря на то что в действующих регламентах нормируется содержание MgO (более 20 %), проведенные эксперименты показывают, что совершенствование технологии получения (гранулометрия, время и температура обжига, добавки-катализаторы) позволяет получить местные вяжущие с прочностью на уровне портландцемента средних и низких марок. При этом снижение относительного содержания MgO до 16 % сопровождается нелинейным падением прочности магнезиального камня.

Экспериментально подтверждена возможность синтеза эффективного магнезиального вяжущего на основе низкосортного доломитового сырья местных месторождений. Регулирование параметров селективного термолиза за счет введения добавок хлоридов позволяет влиять на фазовый состав продукта обжига, преодолевая ограничения, связанные с пороговым содержанием оксида магния.

Полученные результаты представляют интерес для производства радиационно-защитных растворов, огнестойких покрытий и арт-бетонов различного назначения.

Список литературы

1. Радиационно-защитные баритовые и штукатурные покрытия. – URL: <https://alpha-pol.ru/brochure/radiatsionno-zashhitnye-baritovye-napolnye-i-shtukaturnye-pokrytiya.pdf> (дата обращения: 15.11.2025).

2. Обзор рынка магнезиального сырья (магнезита и брусита) и магнезитовых порошков в СНГ. – 3-е изд., доп. и перераб. Research Group. – Москва : ИнфоМайн, 2011. – 137 с.

3. Комплексная переработка минеральных вод / под общ. ред. академика АН УССР Л.Т. Полипенко. – Киев : Наукова думка, 1984.
4. Мухамедова, Н.А. Исследование состава рапы озера Малое Лиманское Астраханской области и его влияния на изменение про- и антиоксидантного баланса у крыс / Н.А. Мухамедова, Е.И. Кондратенко // Физико-химическая биология. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 2 (2). – С. 557–562.
5. Роль процесса смешения растворов реагентов в формировании морфологических особенностей нанокристаллических частиц гидроксида и оксида магния / Т.П. Масленникова, М.Е. Котова, М.С. Ломакин, В.Л. Уголков. – DOI 10.31857/S0044457X22060162 // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67, № 6. – С. 739–749.
6. Balducci, Giulia. Recent progress in the synthesis of nanostructured magnesium hydroxide / Giulia Balducci, Laura Bravo Diaz and Duncan H. Gregory. – DOI: 10.1039/c7ce01570d // CrystEngComm. – 2017. – 19. – 6067–6084.
7. Zahran H.Y., Shneouda S.S., Yahia I.S. [et al.] // J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2018. – V.86, №1. – P. 104. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4613-2>.
8. Li X., Ma C., Zhao J., Li Z., Xu S. and Liu Y. // Powder Technol. – 2010. – 198. – P. 292–297.
9. Henrist C., Mathieu J. P., Vogels C., Rulmont A. and Cloots R., Cryst J. // Growth. – 2003. – 249. – P. 321–330.
10. Pan X., Wang Y., Chen Z., Pan D., Cheng Y., Liu Z., Lin Z. and Guan X. // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2013. – 5. – P.1137–1142.
11. Береговой, В.А. Текстиль-бетоны на магниезиальных вяжущих, армированных натуральными волокнами / В.А. Береговой, А.В. Семилетков, А.С. Присевка // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2025. – № 2(21). – С. 12–20.
12. Цыремпилов, А.Д. Стеновые материалы на основе магниезиально-доломитового цемента / А.Д. Цыремпилов, Н.В. Архинчеева, М.Ю. Истомина // Строительные материалы. – 1998. – №6. – С. 37–38.
13. Орлов, А.А. Энергосбережение при получении магниезиального вяжущего строительного назначения / А.А. Орлов, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2011. – №8(680). – С. 58–61.

References

1. Radiation-protective barite and plaster coatings. – URL: <https://alpha-pol.ru/brochure/radiationno-zashhitnye-baritovye-napolnye-i-shtukaturnye-pokrytiya.pdf> (date of issue: 11/15/2025).
2. Overview of the market of magnesia raw materials (magnesite and brucite) and magnesite powders in the CIS. – 3rd edition, expanded and revised. Research Group. – Moscow : InfoMain Publ., 2011. – 137 p.
3. Complex processing of mineral waters / Edited by Academician of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR L.T. Polypenko. – Kiev : Naukova dumka, 1984.
4. Mukhamedova, N.A. Investigation of the brine composition of Lake Maloe Limanskoe in the Astrakhan region and its effect on changes in the pro- and antioxidant balance in rats /N.A. Mukhamedova, E.I. Kondratenko // Physico-chemical Biology. Bulletin of the Nizhny Novgorod Lobachevsky University. – 2010. – No. 2 (2). – P. 557–562.
5. The role of the mixing process of reagent solutions in the formation of morphological features of nanocrystalline particles of hydroxide and magnesium oxide / Т.П. Масленникова, М.Е. Котова, М.С. Ломакин, В.Л. Уголков. – DOI 10.31857/S0044457X22060162 // Journal of Inorganic Chemistry. – 2022. – Vol. 67, No. 6. – P. 739–749.
6. Balducci, Giulia. Recent progress in the synthesis of nanostructured magnesium hydroxide / Giulia Balducci, Laura Bravo Diaz and Duncan H. Gregory. – DOI: 10.1039/c7ce01570d // CrystEngComm. – 2017. – 19. – 6067–6084.
7. Zahran H.Y., Shneouda S.S., Yahia I.S. [et al.] // J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2018. – V.86, №1. – P. 104. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4613-2>.

-
8. Li X., Ma C., Zhao J., Li Z., Xu S. and Liu Y. // *Powder Technol.* – 2010. – 198. – P. 292–297.
 9. Henrist C., Mathieu J. P., Vogels C., Rulmont A. and Cloots R., Cryst J. // *Growth.* – 2003. – 249. – P. 321–330.
 10. Pan X., Wang Y., Chen Z., Pan D., Cheng Y., Liu Z., Lin Z. and Guan X. // *ACS Applied Materials and Interfaces.* – 2013. – 5. – P.1137–1142.
 11. Beregovoy, V.A. Textile-concretes based on magnesia binders reinforced with natural fibers / V.A. Beregovoy, A.V. Semiletkov, A. S. Prisevka // *Bulletin of the PGUAS: construction, science and education.* – 2025. – № 2(21). – P. 12–20.
 12. Tsyrempilov, A.D. Wall materials based on magnesia-dolomite cement / A.D. Tsyrempilov, N.V. Arkhincheeva, M.Y. Istomin // *Building Materials.* – 1998. – No. 6. – P. 37–38.
 13. Orlov, A.A. Energy saving in the production of magnesia binder for construction purposes / A.A. Orlov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // *Building materials.* – 2011. – No. 8(680). – P. 58–61.

УДК 691.534

DOI 10.54734/20722958_2026_2_25

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Логанина Валентина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Управление качеством»
E-mail: loganin@mai.ru

Российский экономический университет им. В.Г. Плеханова

Россия, 115054, г. Москва,
Стремянный переулок, д.36
тел.: (8495) 958-27-43

Зайцева Мария Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры международного бизнеса
E-mail: zajc@yandex.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Loganina Valentina Ivanovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Quality Management»
E-mail: loganin@mai.ru

Russian University of Economics named after V.G. Plehanov

Russia, 115054, Moscow, 36,
Stremyanny Lane,
tel.: (8495) 958-27-43

Zaytseva Maria Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «International Business»
E-mail: zajc@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Логанина, М.А. Зайцева

Приведены результаты расчета влияния свободной энергии поверхности кварцевых песков на прочность при сжатии известковых композитов на основе гидравлической извести. Рассчитаны полярная и дисперсионная составляющие свободной энергии поверхности кварцевого песка различных месторождений. Предложена модель влияния свободной энергии поверхности кварцевого песка на прочность при сжатии известкового композита. Даны рекомендации по выбору вида дисперсного компонента в рецептуре известкового композита.

Ключевые слова: известковые композиты, свободная энергия поверхности, дисперсный материал, прочность при сжатии, корреляционная зависимость

THE INFLUENCE OF SURFACE ENERGY OF DISPERSED FILLERS ON THE STRENGTH OF LIME COATINGS

V.I. Loganina, M.A. Zaytseva

The article presents the results of calculating the effect of free energy of quartz sand surface on the compressive strength of lime composites based on hydraulic lime. The polar and dispersion characteristics free energy components of the quartz sand surface of various deposits are calculated. A model of the effect of free energy of the quartz sand surface on the compressive strength of a lime composite is proposed. Recommendations on the choice of the type of dispersed component in the formulation of a lime composite are given.

Keywords: lime composites, free energy of the surface, dispersed materials, compressive strength, correlation dependence

Известковые сухие строительные смеси (ССС) широко применяются для отделки и реставрации зданий исторической застройки [1]. Для повышения физико-механических свойств композитов на основе ССС в рецептуру вводят различные модифицирующие добавки [2, 3].

Учитывая важность сохранения исторического наследия, реставрационных работах используют известковые составы на основе гидравлической извести. С целью регулирования структурообразования строительных композитов в их состав вводят тонкодисперсные наполнители, при этом эффективность их применения в числе других факторов определяется объемно-поверхностными свойствами. При анализе структурообразования строительных композитов в качестве одного из факторов, определяющих формирование границы раздела фаз, используется поверхностное натяжение [4-6].

Одной из главных термодинамических характеристик поверхности является ее свободная энергия (СЭП), представляющая собой избыточную энергию поверхности по сравнению с объемом [7].

В процессе измельчения материала происходит переход потенциальной энергии горной породы в поверхностную энергию, которая характеризует активность поверхности дисперсного материала. Представляет интерес создание модели функциональной связи между величиной свободной поверхностной энергии E_s дисперсных компонентов и прочностью строительного композита на основе гидравлической извести.

Целью исследований является оптимизация вида песка с учетом его энергетических характеристик при разработке рецептуры состава на основе гидравлической извести, предназначенного для реставрации зданий исторической застройки.

В качестве вяжущего применяли смесь гидравлической и воздушной извести в соотношении 1:0,25. Использовали природную гидравлическую известь «Тамасли» NHL5, гидравлический модуль которой составляет $M = 2,69$, а также воздушную гашеную известь (пушонка) активностью 83 %. В качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений.

При выборе оптимального вида песка исходили из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризуемой значением свободной поверхностной энергии [8-10].

Для определения значения свободной энергии поверхности (СЭП) покрытий применяли термодинамический метод. Исходные образцы кварцевого песка высушивали и доводили до постоянной массы при температуре 105°C. Определение энергетического состояния проводилось методом ОВРК. Этот метод дает возможность рассчитать свободную энергию поверхности песка как сумму дисперсионной и поляризационной частей: $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d$. В качестве рабочих жидкостей применяли глицерин и воду с известными значениями поверхностного натяжения и его дисперсионной σ_L^d и полярной σ_L^p составляющими. Исследование выполняли на образцах-таблетках, изготовленных путем запрессовки песка на прессе в металлическую форму диаметром 20 мм. Данные измерения краевого угла показали, что для всех исследуемых образцов наблюдается линейная зависимость $\cos\theta=f(\sigma_{ж})$. Экстраполируя зависимость $\cos\theta=f(\sigma_{ж})$ на $\cos\theta=1$, получали значение критического поверхностного натяжения твердой поверхности. Полярную и дисперсионную составляющие рассчитывали с помощью линейной регрессии:

$$\frac{\sigma_L (1 + \cos \theta)}{2\sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^p} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_L^p}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d}, \quad (1)$$

где σ_L – поверхностное натяжение рабочих жидкостей; σ_L^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей; σ_L^p – полярная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей; σ_S^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала; σ_S^p – полярная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала; θ – краевой угол смачивания исследуемого материала.

Дисперсионную составляющую поверхностного натяжения исследуемого материала (песка) σ_s^d определяли как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, равен значению полярной составляющей поверхностного натяжения песка σ_s^p . Для каждого образца проводили не менее пяти измерений (рис. 1).

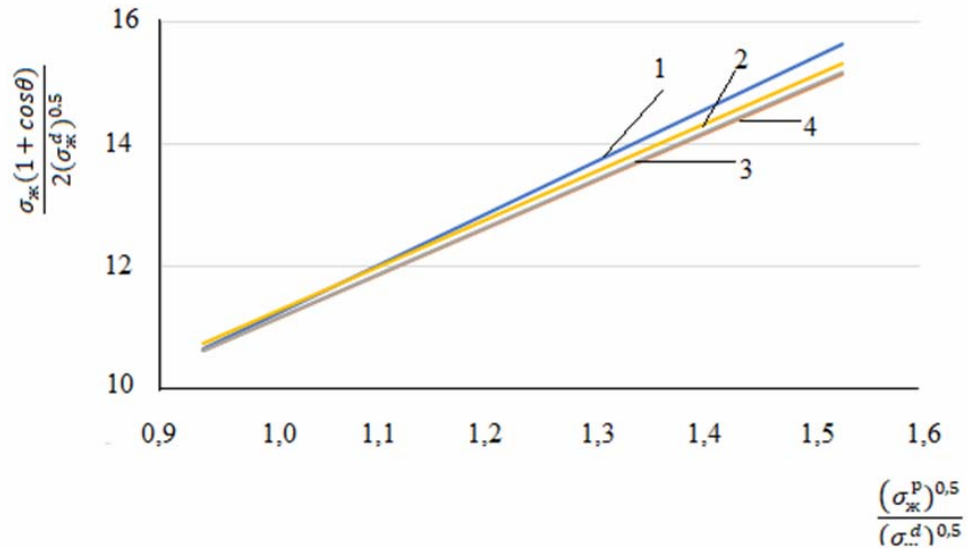


Рис. 1. Свободная энергия поверхности (СЭП) кварцевых песков:
1 – чаадаевский; 2 – сурский; 3 – ртищевский; 4 – раменский

Величина энергии поверхности E определялась общей площадью поверхности дисперсного образца и рассчитывалась по следующему выражению:

$$E = \sigma S_{уд}, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение кварцевого наполнителя; $S_{уд}$ – удельная поверхность кварца.

Прочность при сжатии образцов, получаемых в результате исследований, устанавливали с помощью испытательной машины типа ИР 5057–50 и определяли по формуле

$$R_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (3)$$

где P – разрушающая сила, Н; F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м².

Результаты исследований приведены на рис.2 и в таблице.

Значения свободной энергии поверхности кварцевых песков

Наименование песка	Полярная составляющая СЭП σ^p , мДж/м ²	Дисперсионная составляющая СЭП σ^d , мДж/м ²	СЭП, мДж/м ²	Энергия поверхности, Дж/кг	Прочность при сжатии, МПа
Ртищевский	50,48	18,49	68,97	593,142	1,25
Раменский	53,08	16	69	614,1	1,35
Никольский	50,335	18,49	68,82	557,442	1,225
Сурский	51,79	18,49	70,285	687,106	1,42
Чаадаевский	48,36	14,44	62,8	436,46	1,12

Анализ данных, приведенных в таблице, свидетельствует, что с увеличением значений СЭП кварцевых песков наблюдается повышение прочности при сжатии известкового композита. Так, прочность при сжатии известкового композита на основе сурского песка, характеризующегося более высоким значением свободной энергии поверхности, равной 70,285 мН/м, составляет 1,42 МПа, а на основе песка Чаадаевского месторождения, свободная энергия поверхности которого равна 62,8 мН/м, – 1,12 МПа.

Была установлена корреляционная связь между прочностью при сжатии известкового композита и значением поверхностной энергии (рис.2).

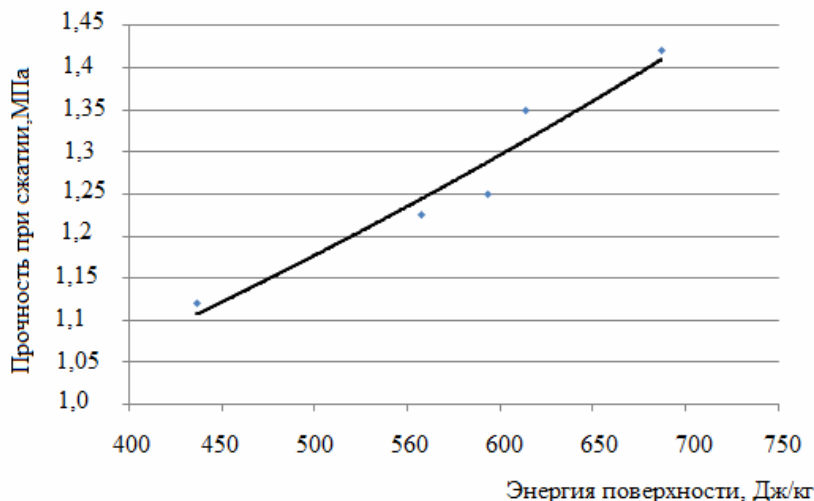


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии известковых композиций от значения поверхностного натяжения кварцевых песков

Установлено, что зависимость между прочностью известкового композита и значением поверхностного натяжения кварцевых песков может быть аппроксимирована уравнением вида

$$y = ae^{bx}, \quad (3)$$

где x – значение энергии поверхности кварцевого песка.

Значения коэффициентов равны: $a = 0,7188$; $b = -0,000983$. Коэффициент корреляции составляет $R=0,968$.

В заключение следует отметить, что оптимальным с энергетической точки зрения является песок сурского месторождения, обеспечивающий более высокую прочность известкового композита.

Список литературы

1. Пухаренко, Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 98–103.
2. Логанина, В.И. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. – 2011. – №12. – С.62–65.
3. Логанина, В.И. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
4. Вешнякова, Л.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов / Л.А. Вешнякова, М.А. Фролова, А.М. Айзенштадт,

В.С. Лесовик, О.Н. Михайлова, Т.А. Махова // Строительные материалы. – 2012. – №10. – С. 53–55.

5. Королев, Е.В. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.П. Пустовгар // Строительные материалы. – 2017. – 1–2. – С. 104–108.

6. Абрамовская, И.Р. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород / И.Р. Абрамовская, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, Л.А. Вешнякова, А.С. Тутьгин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2013. – № 3. – С. 56–65.

7. Вешнякова, Л.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов / Л.А. Вешнякова, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 2. – С. 68–72.

8. Морозова, М.В. Определение энергетических параметров песков на примере месторождений Архангельской области / М.В. Морозова, М.В. Акулова, М.А. Фролова, Ю.А. Щепочкина // Материаловедение. – 2020. – №9. – С. 45–48.

9. Rudawska, A. Analysis for determining surface free energy uncertainly by the Owens–Wendt method / A. Rudawska, E. Jacniacka // Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29, № 4. – P. 451–457.

10. Huhtamäki, T. Surface-wetting characterization using contactangle measurements / T. Huhtamäki [et al.] // Nature protocols. – 2018. – Vol. 13, № 7. – P. 1521–1538.

References

1. Pukhareno, Yu.V. Restoration of historical objects using modern dry building mixes / Yu.V. Pukhareno, A.M. Kharitonov, N.N. Shanghina, T.Yu. Safonova // Bulletin of civil engineers. – 2011. – No. 1. – P. 98–103.

2. Loganina, V.I. Study of patterns of influence of silicic acid sol on the structure and properties of diatomite / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Construction materials. – 2011. – No. 12. – P. 62–65.

3. Loganina, V.I. Optimization of the composition of general-purpose composites modified with nanosized additives / V.I. Loganina, L.V. Makarova, R.V. Tarasov, O.A. Davydova // Regional Architecture and Construction. – 2010. – No. 2. – P. 53–57.

4. Veshnyakova, L.A. Assessment of the Energy State of Raw Materials for Obtaining Building Materials / L.A. Veshnyakova, M.A. Frolova, A.M. Aizenshtadt, V.S. Lesovik, O.N. Mikhailova, T.A. Makhova // Building Materials. – 2012. – No. 10. – P. 53–55.

5. Korolev, E.V. Surface Tension in the Structure Formation of Materials. Significance, Calculation, and Application / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.P. Pustovgar // Building Materials. – 2017. – 1–2. – P. 104–108.

6. Abramovskaya, I.R. Energetics of highly dispersed rock composites / I.R. Abramovskaya, A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, L.A. Veshnyakova, A.S. Tutygin // Nanotechnology in Construction: scientific online journal. – 2013. – No. 3. – P. 56–65.

7. Veshnyakova, L.A. Evaluation of surface activity of highly dispersed raw materials for composite building materials / L.A. Veshnyakova, A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova // Physics and chemistry of materials processing. – 2015. – No. 2. – P. 68–72.

8. Morozova, M.V. Determination of energy parameters of sands using the example of deposits in the Arkhangelsk region / M.V. Morozova, M.V. Akulova, M.A. Frolova, Yu.A. Shchepochkina // Materials Science. – 2020. – No. 9. – P. 45–48.

9. Rudawska, A. Analysis for determining surface free energy uncertainly by the Owens–Wendt method / A. Rudawska, E. Jacniacka // Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2009. – Vol. 29, № 4. – P. 451–457.

10. Huhtamäki, T. Surface-wetting characterization using contactangle measurements / T. Huhtamäki [et al.] // Nature protocols. – 2018. – Vol. 13, № 7. – P. 1521–1538.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Перекусихина Альбина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Математика и математическое
моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Гарькина Ирина Александровна,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Математика
и математическое моделирование»
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Perekusikhina Albina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Mathematics and
Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

Garkina Irina Aleksandrovna,
Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mathematics
and Mathematical Modeling»
E-mail: fmatem@pguas.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

А.Н. Перекусихина, И.А. Гарькина

Проанализирован метод построения экспериментально-статистических моделей для прогнозирования физико-механических свойств наполненных эпоксидных связующих в строительном материаловедении. Такой подход позволяет, во-первых, оптимальным образом поставить эксперимент и, во-вторых, количественно описать реакцию исследуемого объекта на комбинированное воздействие факторов. Разработанные математические модели и методология планирования эксперимента дают возможность: прогнозировать прочностные свойства наполненных эпоксидных связующих при различных сочетаниях факторов; целенаправленно управлять структурой композита для достижения заданных эксплуатационных характеристик; сокращать число натуральных экспериментов за счет обоснованного выбора точек факторного пространства.

Ключевые слова: композиционные материалы, эпоксидные связующие, аппретирование, модификация, экспериментально-статистические модели, полиномиальные модели, планирование эксперимента, прочность при сжатии, прочность при изгибе

PREDICTING THE STRENGTH PROPERTIES OF FILLED EPOXY BINDERS: AN EXPERIMENTAL-STATISTICAL APPROACH

A.N. Perekusikhina, I.A. Garkina

This paper analyzes a method of constructing experimental-statistical models for predicting physical and mechanical properties of filled epoxy binders in construction materials science. This approach allows, firstly, optimal experimental design and, secondly, quantitatively describing the response of the test object to the combined effects of factors. The developed mathematical models and experimental design methodology enable: predicting the strength properties of filled epoxy binders under various factor combinations; purposefully controlling the composite structure to achieve specified performance characteristics; and reducing the number of full-scale experiments through the rational selection of factor space points.

Keywords: composite materials, epoxy binders, filling, finishing, modification, experimental-statistical models, polynomial models, experimental design, compressive strength, flexural strength

Выбор общего вида экспериментально-статистической модели (совокупность представлений, методов и алгоритмов, связывающая математическое планирование эксперимента, регрессионный анализ и другие средства прикладной статистики) является неформальной и наиболее сложной операцией, выражающей компромисс между простотой и содержательностью. При этом содержательность определяется только смыслом, которым наделяются параметры модели, и не связана с адекватностью, определяемой методами математической статистики [1...8].

Свойства строительных материалов определяются составом сырьевой смеси (цемент, заполнители, добавки); параметрами технологии (температура, давление, время твердения); условиями эксплуатации (влажность, агрессивные среды, циклические нагрузки). В строительном материаловедении многие факторы (состав, структура, технология, внешние воздействия) взаимосвязаны нелинейно и не всегда поддаются четкой параметризации. Полиномиальные модели же позволяют учитывать совместное влияние этих факторов без избыточной детализации.

Выбор полиномиальных моделей невысокого порядка (1...3-го) обусловлен рядом практических соображений:

- модели низких порядков легко интерпретировать и вычислять;
- они способны уловить основные тенденции (линейные, квадратичные, кубические) в данных, не перегружая описание избыточной сложностью;
- в реальных исследованиях число опытов редко превышает 15-20 точек, а полиномы высоких порядков (более 4) требуют большего объема данных для устойчивой оценки параметров;
- коэффициенты линейного и квадратичного членов можно связать с чувствительностью свойства к изменению фактора (первый коэффициент), наличием экстремума или точки перегиба (второй коэффициент).

Параметры полинома (коэффициенты при неизвестных) необязательно имеют прямую физическую трактовку, но позволяют аппроксимировать наблюдаемую зависимость с приемлемой точностью.

Высокие порядки полиномов склонны к переобучению: они точно проходят через экспериментальные точки, но плохо обобщаются на новые данные. Полиномы 1-3-го порядков менее чувствительны к случайным отклонениям и лучше отражают систематические эффекты.

Для прогнозирования свойств материалов, оптимизации составов и технологических режимов часто достаточно знать направленность и характер зависимости (возрастает, убывает, имеет экстремум и т.д.), а не ее точную аналитическую форму. Полиномиальные модели дают такую информацию при минимальных затратах на эксперимент и обработку; они остаются рабочим инструментом в строительном материаловедении благодаря простоте построения и анализа; достаточной гибкости для описания экспериментальных данных; совместимости с методами планирования и статистической проверки [1, 9...12]. При этом их применение требует осознанного выбора диапазона факторов и откликов; проверки адекватности по критериям статистики; интерпретации результатов в контексте физико-химических и технологических представлений о композите.

Такие модели являются частным случаем моделей, линейных по параметрам:

$$y(\mathbf{x}) = b_1\varphi_1(\mathbf{x}) + b_2\varphi_2(\mathbf{x}) + \dots + b_L\varphi_L(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где y – предсказанное значение отклика; x – значения действующих переменных (варьируемых факторов); $\varphi_j(\mathbf{x})$, $j = \overline{1, L}$ – не зависящие от параметров модели базисные функции.

Вектор $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_L)^T$ параметров модели ((1) вычисляется в соответствии с соотношением

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} = \mathbf{D} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \varphi_1(\mathbf{x}_1) & \varphi_2(\mathbf{x}_1) & \dots & \varphi_L(\mathbf{x}_1) \\ \varphi_1(\mathbf{x}_2) & \varphi_2(\mathbf{x}_2) & \dots & \varphi_L(\mathbf{x}_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_1(\mathbf{x}_N) & \varphi_2(\mathbf{x}_N) & \dots & \varphi_L(\mathbf{x}_N) \end{pmatrix} -$$

матрица базисных функций; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ – вектор откликов; \mathbf{M} – матрица моментов; \mathbf{D} – ковариационная матрица.

Для оптимального выбора значений входных переменных привлекалась нормализованная неопределённость – характеристика, связанная с ковариационной матрицей плана эксперимента:

$$d = \mathbf{x}_p^T \mathbf{D} \mathbf{x}_p, \quad (3)$$

где \mathbf{x}_p – вектор-столбец, образованный значениями базисных функций в соответствующей точке факторного пространства:

$$\mathbf{x}_p = (\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_L(\mathbf{x}))^T.$$

Соотношение (3) свидетельствует, что ковариационная матрица \mathbf{D} есть матрица квадратичной формы, определяющей метрику в L -мерном пространстве, координатами в котором являются значения базисных функций.

Критерием, на основании которого можно сделать вывод о количестве информации, содержащейся в предсказанном значении отклика, является связанная с формулой (3) информационная функция плана эксперимента

$$I_x = \frac{1}{d} = (\mathbf{x}_p^T \mathbf{D} \mathbf{x}_p)^{-1}. \quad (4)$$

Известный двухэкстремальный характер зависимостей физико-механических и эксплуатационных показателей от объёмной степени наполнения требует привлечения экспериментально-статистических моделей (ЭС-модели), в которые входит одна из действующих переменных в степени не ниже трёх. При этом для двухфакторной модели

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{111} x_1^3$$

не удаётся отыскать параметры по результатам экспериментов, выполненных в соответствии с известными ротатбельным и композиционным планами (матрицы моментов становятся вырожденными). Кроме этого, число оцениваемых параметров совпадает с числом опытов указанных планов; использование насыщенных планов затрудняет последующий статистический анализ.

Для построения двухфакторных кубических ЭС-моделей свойств наполненных связующих использован 10-точечный план, полученный из центрального ротатбельного плана для квадратичной модели. Из плана исключена центральная точка. На оси действующей переменной, входящей в ЭС-модель в третьей степени, добавлены две центрально-симметричные точки, находящиеся на расстоянии $\sqrt{2}$ друг от друга. В центральной части факторной области информационная функция сохраняет приблизительно постоянное и сравнительно высокое значение, что положительно сказывается на дисперсии оцениваемых параметров модели.

После проверки однородности дисперсий параллельных опытов и отыскания параметров ЭС-модели для каждого из найденных параметров проверялась гипотеза о

равенстве истинного значения коэффициента нулю. Для проверки значимости параметра b_j , $j = \overline{1, L}$ вычислялось значение статистики

$$t_j = \frac{\beta_j}{\sqrt{s_e^2 c_{jj}}}, \quad (5)$$

где s_e^2 – дисперсия воспроизводимости; c_{jj} – диагональный элемент ковариационной матрицы.

Статистика (5) подчинена распределению Стьюдента с $f = f_e = N(M - 1)$ степенями свободы (в случае неортогональных планов это выполнено лишь приближённо).

Гипотеза о равенстве нулю неизвестного истинного значения j -го параметра отвергалась в пользу двусторонней альтернативы, если вероятность

$$p_j = \int_{-\infty}^{-t_j} f(x) dx + \int_{t_j}^{\infty} f(x) dx = 1 - 2 \int_0^{t_j} f(x) dx \quad (6)$$

($f(x)$ – плотность распределения Стьюдента) критического события, состоящего в том, что при указанной гипотезе будет получено значение β_j , большее или равное найденному в эксперименте, оказывалась меньше заданного уровня значимости.

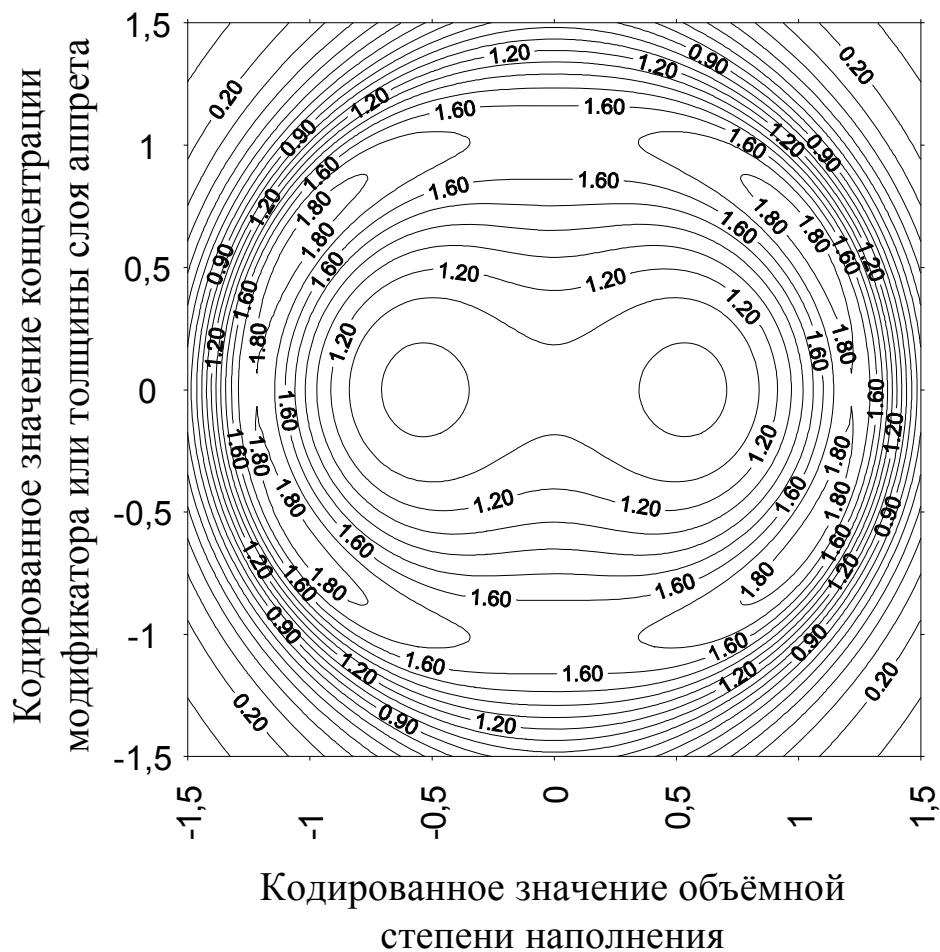


Рис. 1. Информационная функция предложенного плана эксперимента (табл.1)

Значения действующих переменных

ЭС, наполненное аппретированным ОПОС			ЭС, наполненное техническим углеродом и модифицированное ФХУЖ		
№ серии	Объемная степень наполнения	Расчётная толщина слоя аппрета, нм	№ серии	Объемная степень наполнения	Концентрация ФХУЖ, %
1	0,527	6,4	11	0,221	2,56
2	0,173	6,4	12	0,08	2,56
3	0,527	1,1	13	0,221	0,44
4	0,173	1,1	14	0,08	0,44
5	0,35	7,5	15	0,15	3
6	0,35	0	16	0,15	0
7	0,6	3,75	17	0,25	1,5
8	0,1	3,75	18	0,05	1,5
9	0,475	3,75	19	0,2	1,5
10	0,225	3,75	20	0,1	1,5

Все незначимые параметры ЭС-модели принимались равными нулю (соответствует уменьшению числа базисных функций). Так как ковариационная матрица содержала ненулевые внедиагональные элементы (план не ортогонален), то оставшиеся параметры модели отыскивались повторно по формуле (2).

Для проверки адекватности полученной ЭС-модели результатам эксперимента вычислялась остаточная дисперсия (дисперсия адекватности):

$$s_{ad}^2 = \frac{M}{N-L} \sum_{u=1}^N (y_u - f(x_u))^2, \quad (7)$$

где N – число различных экспериментов (число точек плана эксперимента); L – число искоемых параметров модели.

Затем вычислялось значение статистики

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_e^2}, \quad (8)$$

где s_e^2 – дисперсия воспроизводимости.

Статистика (8) подчинена распределению Фишера с $f_{ad} = N - L$ и $f_e = N(M - 1)$ степенями свободы. Гипотеза адекватности модели эксперименту отвергалась, если вероятность

$$p = \int_F^{\infty} f(x) dx = 1 - \int_0^F f(x) dx = 1 - G(F)$$

($f(x)$ и $G(x)$ – плотность и функция распределения Фишера, соответственно) критического события (состоящего в том, что при адекватной модели значение F будет не меньшим, чем в эксперименте) оказывалась меньше выбранного уровня значимости.

Было проведено исследование 20 серий образцов наполненного эпоксидного связующего. Наполнителем серий 1...10 являлся полиминеральный отход производства оптического стекла ТФ-110 (ОПОС), аппретированный раствором полиметилфенилсилоксана (ПМФС) в ароматическом растворителе; серий 11...20 – технический углерод (ТУ). Связующее второй серии модифицировано фторхлоруглеродной жидкостью (ФХУЖ). По результатам экспериментальных исследований с применением

методов математической теории эксперимента и плана эксперимента построены линейные по параметрам ЭС-модели неполного третьего порядка.

Модели предела прочности при сжатии эпоксидного связующего (МПа) имеют вид:

– для ЭС на основе ОПОС:

$$R_p = 163 + 32,9x_1 - 16,7x_2 - 1,17x_1^2 - 6,17x_2^2 + 8,88x_1^2x_2 - 0,86x_1x_2^2 - 12x_1^3 - 7,87x_2^3;$$

– для ЭС на основе ТУ:

$$R_p = 141 + 29x_1 - 20,1x_2 - 0,5x_1^2 - 7x_2^2 + 10,7x_1^2x_2 - 2,68x_1x_2^2 - 11,3x_1^3 + 9,46x_2^3,$$

где x_1 – кодированное значение объемной степени наполнения; x_2 – кодированное значение расчётной толщины слоя аппрета (эпоксидное связующее (ЭС) на основе ОПОС) или кодированное значение концентрации модификатора (ЭС на основе технического углерода (ТУ)) [2].

Известно, что прочность эпоксидного композита определяется свойствами его компонентов и интенсивностью физико-химического взаимодействия на межфазной границе [1].

Анализ характера приведённых зависимостей подтверждает корректность исходных предположений при определении диапазона варьирования действующих переменных. Для всех исследованных составов, которые могут быть рекомендованы как микроструктура эпоксидного композита, экстремальные значения предела прочности при сжатии достигаются при промежуточных значениях варьируемых факторов. Область наиболее интенсивных структурных трансформаций в ЭС на основе ОПОС определяется неравенствами $0,1 < v_f < 0,2$ и $0,4 < v_f < 0,6$.

Двухэкстремальный характер полученных зависимостей отражает структурные трансформации в эпоксидном связующем. При увеличении объёмной степени наполнения образуется жёсткий каркас из частиц наполнителя, связанных прослойками плёночной фазы матрицы, что сопровождается выходом прочностных показателей на максимальное значение. Формирование на частицах наполнителя слоя аппрета оптимальной толщины сопровождается дополнительным возрастанием прочности на 11 %; модификация вяжущего фторхлоруглеродными жидкостями приводит к росту прочности на 17 %. Последнее можно объяснить селективной адсорбцией модифицирующей добавки частицами технического углерода, эффект которой соответствует применению аппрета (в процессе совмещения компонентов модификатор мигрирует к поверхности наполнителя).

В целом, для связующего на основе ТУ характерны несколько меньшие (по сравнению с составами, наполненными ОПОС) значения предела прочности при сжатии. Наиболее перспективным способом управления прочностью ЭС на основе тонкодисперсного ОПОС следует признать аппретирование наполнителя, позволяющее повысить прочность на 7...12 %.

Аппретирование поверхности наполнителя малой дисперсности, способствуя снижению негативного влияния малых долей наполнителя, в то же время не позволяет повысить прочность в области, соответствующей оптимальному наполнению.

Модели предела прочности при изгибе ЭС (МПа) имеют вид:

– для ЭС на основе ОПОС:

$$R_b = 38,8 - 0,75x_1 + 0,335x_2 + 0,85x_1x_2 - 1,53x_1^2 - 0,9x_2^2 + 0,178x_1^2x_2 + 0,034x_1x_2^2 - 0,34x_1^3 - 0,157x_2^3;$$

– для ЭС на основе ТУ:

$$R_b = 45,2 + 3,1x_1 - 13,4x_2 + 1,1x_1x_2 - 3,5x_1^2 - 1,2x_2^2 + 7,1x_1^2x_2 + 0,59x_1x_2^2 + 0,471x_1^3 + 6,3x_2^3,$$

где x_1 – кодированное значение объемной степени наполнения; x_2 – кодированное значение расчётной толщины слоя аппрета или кодированное значение концентрации модификатора.

Анализ моделей позволяет заключить, что максимальное значение предела прочности при изгибе соответствует составам с несколько меньшей объёмной степенью наполнения (по сравнению со значением, оптимальным с точки зрения предела прочности при сжатии). Для составов с избыточным содержанием наполнителя градиент предела прочности ориентирован практически перпендикулярно оси концентраций, прочностные характеристики определяются главным образом объёмной долей наполнителя.

Выводы:

- Построены ЭС-модели предела прочности при сжатии и изгибе для ЭС на основе ОПОС и ТУ.
- Выявлены двухэкстремальные зависимости прочности от объёмной степени наполнения и параметров модификации.
- Установлено, что аппретирование ОПОС повышает прочность на 7-12 % при сжатии и на 15 % при изгибе, модификация ТУ фторхлоруглеродными жидкостями – на 17 % при сжатии и на 4 % при изгибе.
- Определены оптимальные диапазоны варьирования факторов, соответствующие максимальным прочностным показателям.
- Экспериментально-статистический подход доказал свою эффективность для анализа сложных зависимостей в эпоксидных композитах.
- Полученные модели могут служить основой для оптимизации составов эпоксидных связующих, прогнозирования прочностных характеристик при изменении параметров наполнения и модификации и разработки технологий производства высокопрочных строительных материалов.

Список литературы

1. Данилов, А.М. Радиационно-защитные композиты на эпоксидном вяжущем: модификация, моделирование, оптимизация структуры и свойств / А.М. Данилов, А.Н. Круглова, В.П. Селяев, В.В. Цыганов. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 214 с.
2. Смирнов, В.А. Моделирование каркасов строительных композитов: расчётная схема и реализация / В.А. Смирнов, А.М. Данилов, Е.В. Королёв, А.Н. Круглова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 45–52.
3. Низина, Т.А. Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты / Т.А. Низина, В.В. Володин, Х.Б. Матякубов // Умные композиты в строительстве. – 2024. – Т. 5, № 3. – С. 19–30.
4. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
5. Будылина, Е.А. Современные подходы к проектированию композиционных материалов как систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 55–59.
6. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
7. Куимова, Е.И. Моделирование процесса самоочистки известковых покрытий / Е.И. Куимова, В.И. Логанина, А.Д. Рыжов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4 (65). – С. 38–44.
8. Гришина, А.Н. Статистическое моделирование как метод выявления коррозии цементных композитов / А.Н. Гришина, А.Н. Земляков, Е.В. Королёв, К.Ю. Охотникова, В.А. Смирнов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 4. – С. 87–97.

9. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // *Architecture and Engineering*. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32.
10. Smirnov, V. Multiscale material design in construction / V. Smirnov, A. Evstigneev, E. Korolev // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – P. 03027.
11. Smirnov V.A., Korolev E.V., Evstigneev A.V., Poddaeva O.I. Modeling the building materials: applications of particle dynamics / *ИОАВ Журнал*. – 2016. – Vol. 7, № 1. – P. 496–503.
12. Низина, Т.А. Релаксационные характеристики полимеров на основе эпоксидных связующих / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, И.П. Спирин, Н.С. Канаева // *Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2024. – № 1 (12). – С. 55–57.

References

1. Danilov, A.M. Radiation-protective composites on epoxy binder modification, modeling, optimization of structure and properties / A.M. Danilov, A.N. Kruglova, V.P. Selyaev, V.V. Tsyganov. – Saransk : Publishing house of Mordov. University, 2013. – 214 p.
2. Smirnov, V.A. Modeling of frames of building composites: calculation scheme and implementation / V.A. Smirnov, A.M. Danilov, E.V. Korolev, A.N. Kruglova // *Regional architecture and engineering*. – 2011. – № 1. – P. 45–52.
3. Nizina, T.A. Application of experimental and statistical modeling of the process of heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites / T.A. Nizina, V.V. Volodin, H.B. Matyakubov // *Smart composites in construction*. – 2024. – Vol. 5, №3. – P. 19–30.
4. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Y. Skachkov // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417.
5. Budylnina, E.A. Modern approaches to the design of composite materials as systems / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – № 2 (63). – P. 55-59.
6. Chernyshov E.M., Makeev A.I. The problem of complexity and systematicity of qualitative description and statistical reliability of quantitative assessment of the structural characteristics of building composites / *Expert: theory and practice*. – 2022. – № 2 (17). – P. 75-80
7. Kuimova, E.I. Modeling the self-cleaning process of lime coatings / E.I. Kuimova, V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – № 4 (65). – P. 38–44.
8. Grishina, A.N. Statistical modeling as a method for detecting corrosion of cement composites / A.N. Grishina, A.N. Zemlyakov, E.V. Korolev, K.Yu. Okhotnikova, V.A. Smirnov // *Bulletin of MGSU*. – 2014. – № 4. – P. 87–97.
9. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // *Architecture and Engineering*. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32.
10. Smirnov, V. Multiscale material design in construction / V. Smirnov, A. Evstigneev, E. Korolev // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – P. 03027.
11. Smirnov, V.A. Modeling the building materials: applications of particle dynamics / V.A. Smirnov, E.V. Korolev, A.V. Evstigneev, O.I. Poddaeva // *ИОАВ Журнал*. – 2016. – Vol. 7, № 1. – P. 496–503.
12. Nizina, T.A. Relaxation characteristics of polymers based on epoxy binders / T.A. Nizina, D.R. Nizin, I.P. Spirin, N.S. Kanaeva // *Polymers in construction: scientific online journal*. – 2024. – № 1 (12). – P. 55–57.

Самарский государственный
экономический университет

Россия, 443090, г. Самара,
ул. Советской Армии, 141

Абрахимов Владимир Закирович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Землеустройство и экология»
E-mail: 3375892@mail.ru

Samara State University of Economics

Russia, 443090, Samara,
141, Sovetskaya Armiya St.

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Land Management and
Ecology»
E-mail: 3375892@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПОРИСТОСТЬ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОСТЕКЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ

В.З. Абрахимов

Получены пористые заполнители на основе алюмосодержащего шлака и жидкостекляной композиции, теплопроводность которых не превышает $0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Эксперименты продемонстрировали, что на внешней конфигурации исследуемого образца, созданного из оптимальной композиции, пористость значительно меньше идентифицирована и активирована, чем во внутренней пористой структуре образца, что, по-видимому, ассоциируется с тем, что в образце глубинная пористость образована из изолированных пор (замкнутых), не выходящих на поверхность изделия. Анализ данных показал, что образцы из оптимальной композиции (с повышенной концентрацией шлака) содержат минералы с высокой огнеупорностью (магнезиальная шпинель, оксид хрома, корунд и майенит).

Ключевые слова: металлургический шлак, жидкостекляная композиция, пористый заполнитель, замкнутые поры, фазовый состав

INFLUENCE OF METALLURGICAL SLAG ON TECHNICAL INDICATORS AND POROSITY OF POROUS FILLER BASED ON LIQUID GLASS COMPOSITION

V.Z. Abdrakhimov

Refractory porous fillers based on aluminum-containing slag and a liquid-glass composition, the thermal conductivity of which does not exceed $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, have been obtained. Experiments have shown that on the external configuration of the sample created from an optimal set of components, porosity is less highlighted and emphasized than in the depth of the porous structure of the sample, which is probably associated with the fact that the deep porosity in the sample is formed from isolated (closed) pores. Data analysis has showed that the samples from the best combination of components include minerals with high fire resistance: magnesia spinel, chromium oxide, corundum and mayenite.

Keywords: metallurgical slag, liquid glass composition, porous filler, closed pores, phase composition

Введение. Вследствие роста цен на энергоносители возникает насущная необходимость в ликвидации утечки тепла в отапливаемых сооружениях и зданиях, а на территориях с жарким климатом – в уменьшении затрат на вентиляционные и кондиционированные работы [1-3]. Для решения принципиальных задач требуются передовые и недорогие теплоизоляционные материалы на основе техногенного сырья (отходы производств) и жидкостекляных композиций.

К оптимальным теплоизоляционным материалам, которые необходимо использовать для строительства энергоэффективных сооружений, следует отнести мелкопористые изделия типа керамзита. Но керамзит может производиться только при наличии в достаточном количестве кондиционного алюмосиликатного сырья – достаточно хорошо вспучивающихся монтмориллонитовых глин.

Для получения мелкопористых изделий с большим количеством замкнутых пор, называемых пористыми заполнителями, уместно в качестве связующего использовать жидкое стекло, обладающее адгезионными и клеящими свойствами. В работах [3-6] показано, что, благодаря феноменальным свойствам жидкого стекла, его можно активно применять для получения изделий с пористой структурой. Жидкое стекло в настоящее время относится к крупнотоннажному товару неорганического синтеза и изготавливается в больших масштабах практически во всех передовых развитых странах [5].

Подразделение в керамической индустрии, к которой в том числе относится выпуск пористых материалов для заполнения легких бетонов и т.д., испытывает дефицит натурального алюмосиликатного традиционного сырьевого ресурса, главным образом отощителей и наполнителей.

Цель работы: оценить влияние шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома на технические показатели (включая и пористость) пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции, используемой в качестве связующего компонента, который обладает уникальными адгезионными клеящими свойствами.

Методика исследования. Проводились исследования детализированного поэлементного химического состава и внутренней структуры шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома (электронное фото) с практическим использованием сканирующего микроскопа с электронным лучом JSM 6390A фирмы Jeol. Япония [1, 3, 6]. Идентификация и опознавание в сырьевых составляющих аморфных и кристаллических минералогических компонентов реализовывались с помощью петрографических техник, механизмов и электронных микроскопов Nu-2E, МИН-7 и МИН-8 при употреблении иммерсионных препаратов, прозрачных срезов (прозрачные шлифы) и полированных шлифов (аншлифы). Диагностика размеров включений в анализируемых сырьевых ресурсах осуществлялась посредством металлографического осмотра при 200-кратном увеличении на микроскопе МИН-8. Сырьевые включения при растворении переходили в спиртовой раствор, а затем их размещали на поверхности стекла и фотографировали камерой. Компетентное управление измерительной шкалой микромера (1 дел. = 0,001 мм) позволяет определить среднюю мерность компонентов.

Экспериментальная часть

Сырьевые материалы. В процессе формирования пористого заполнителя были активированы следующие сырьевые ресурсы: жидкое стекло в качестве связующего, а наполнитель – шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома.

Шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома. Химические составы шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома представлены: оксидный – в табл. 1; поэлементный – в табл. 2; фракционный (гранулометрический) – в табл. 3, на рис. 1 – металлографический анализ; минералогический – на рис. 2, а микроструктура – на рис. 3.

Т а б л и ц а 1

Усредненный оксидный химический состав шлака
от выплавки безуглеродистого феррохрома

Содержание оксидов, мас. %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O
5,9	56,8	0,8	15,9	12,7	5,6	2,3

Поэлементный химический состав шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома

Содержание элементов, мас. %								
O	Na	Mg	Al	Si	Cr	K	Ca	Fe
49,3	0,9	5,4	27,4	3,7	3,6	0,6	8,4	0,7

Фракционный состав шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома

Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,0001
10,84	24,41	25,49	12,88	26,38

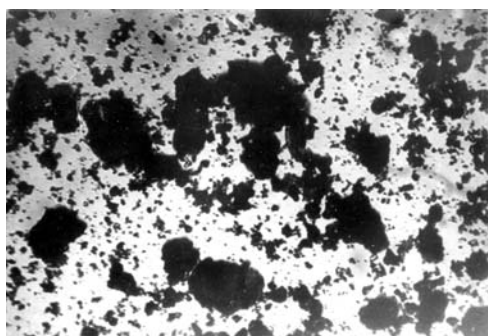


Рис. 1. Металлографический анализ шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома



Рис. 2. Минералогический состав шлака от выплавки безуглеродистого феррохрома

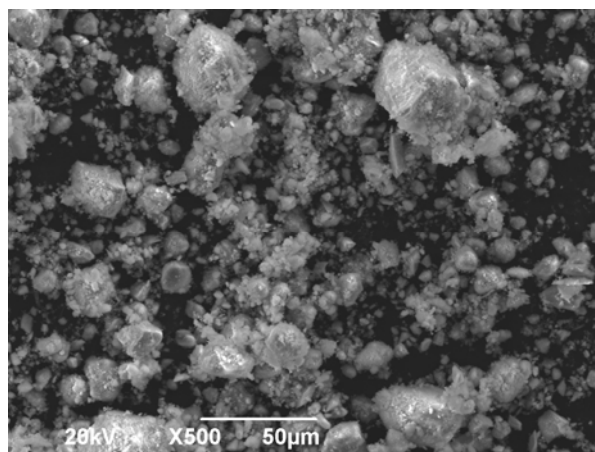


Рис. 3. Электронное фото шлака от выплавки безуглеродистого хрома. Увеличение X500

Оцениваемый шлак выделяется плотной и прочной структурой порфира с фрагментами магнезиальной шпинели с повышенным содержанием оксидов алюминия ($Al_2O_3 > 50\%$), кальция ($CaO > 15\%$), магния ($MgO > 12\%$) и ($Cr_2O_3 > 5\%$) (см. табл. 1). Композиция минеральных составляющих шлака проиллюстрирована на рис. 2, а основные свойства приведены в табл. 4 [7-9].

Свойства кристаллических фаз (минералов), входящих в шлак от выплавки безуглеродистого хрома

Минерал	Содержание фракций в %, размер частиц в мм			
	Температура плавления, °С	Плотность, г/см ³	Твердость по шкале Мооса	Микротвердость, кг/мм ²
1. Корунд Al ₂ O ₃	2050	3,9-4,1	9	2108
2. Бонит CaO·6Al ₂ O ₃	1850	3,38	6,5-7	1200-1300
3. Оксид хрома Cr ₂ O ₃	2435	5,21	8,5	1900-2000
4. Майенит 12CaO·7Al ₂ O ₃	1633-1728	2,9	6,0-6,5	1150-1250
5. Магнезиальная шпинель MgAl ₂ O ₄ (MgO·Al ₂ O ₃)	2135	4,05	7,5-8	1378-1505
6. Стеклофаза на основе диоксида кремния	1550-1600	2,648	6,0-6,5	628-683 кг/мм ²

Фундаментальную прочность шлаку создают минералы – корунд и бонит, концентрация которых в шлаке соответственно равна 35 % и 29 %, что в итоге составляет 64 %. Все минералы, входящие в шлак, – огнеупорные (температура плавления выше 1550°C). Повышенная концентрация корунда в шлаке существенно усилит в пористом изделии прочность [8, 10-12].

Жидкостекольная композиция. При компоновке структуры композиции для пористого изделия в качестве связующего применялось жидкое стекло R₂O_nSiO₂+ mH₂O, где R – щелочной катион (Na⁺, K⁺, Li⁺ или NH₄⁺); n – силикатный модуль жидкого стекла (отношение кремнеземистого компонента к щелочному); m – количество молекул воды [3, 4, 6, 12].

Добавление в жидкое стекло наполнителей и добавок-коагуляторов вызывает структурирование конструкции для достижения единообразия уже в самих структурах. Хлорид натрия, отвечающий требованиям спецификации ГОСТ 13830-97, производства ОАО «Бассоль», дробленный до ультратонкого размера (0,3 мм), целесообразно использовать в качестве добавки-коагулятора в жидком стекле для создания жидкостекольной смеси (композиции).

Способ получения. При работе промышленных предприятий образуются отходы, оказывающие токсичное воздействие на экологические системы [13-16]. Проектирование и внедрение результативных технологий по рециклингу отходов – остро стоящая задача. Композиции для производства пористого заполнителя, составы которых представлены в табл. 5, готовились по технологическому методу, на который получен патент РФ [17]. Метод предусматривает тщательное перемешивание всех компонентов.

Т а б л и ц а 5

Составы композиции для производства пористого заполнителя.

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
Натриевое жидкое стекло плотностью 1,41 г/см ²	47	21	15
Хлорид натрия, размолотый до размера менее 0,3 мм	3	4	5
Шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома	50	75	80

Перемешивание компонентов выполнялось в смесительном механизме с принудительным включением в следующем порядке: а) прежде всего дислоцирующие шлак и хлорид натрия в процессе сухого перемешивания тщательно гомогенизируются; б) в гомогенную композицию вливается при работающем смесителе жидкое стекло, и

осуществляется перемешивание в течение 5-8 минут; в) композиция дифференцируется на отдельные гранулы, которые в печном грануляторе до вспучивания термообрабатываются при 250-300°C, в результате образуются сферические гранулы с повышенной пористостью (рис. 4); г) изготовленные гранулы укладываются в разогретую до 1000°C электрическую камеру для обжига, в которой образцы выдерживаются в течение 10-15 минут.

Физико-механические показатели пористого заполнителя представлены в табл. 6.

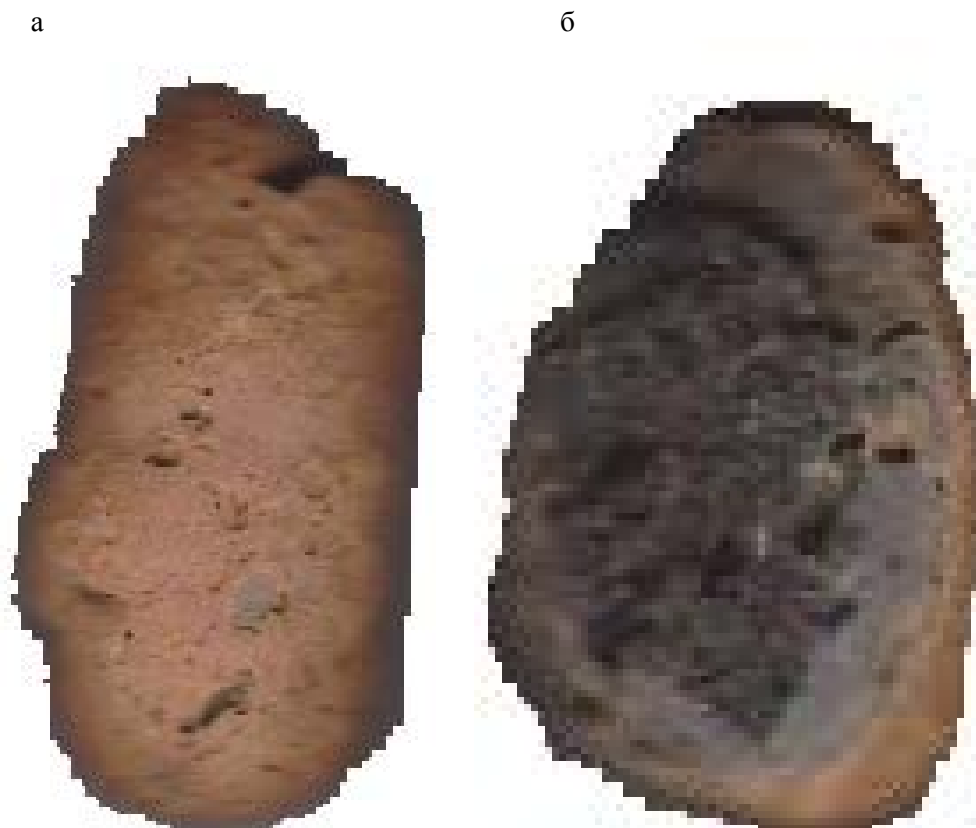


Рис. 4. Фото пористого заполнителя, вид:
а – внешний; б – внутренний

Т а б л и ц а 6

Физико-механические показатели пористого заполнителя

Показатель	Состав		
	1	2	3
Прочность на сжатие, МПа	2,25	2,28	2,30
Насыпная плотность, кг/м ³	335	348	405
Потери при 5-минутном кипячении, %	0,117	0,095	0,093
Коэффициент размягчения, %	94,9	94,3	93,8
Марка по насыпной плотности	350	350	400
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,195	0,212	0,220

Электронное фото пористого заполнителя состава №2 приведено на рис. 5.

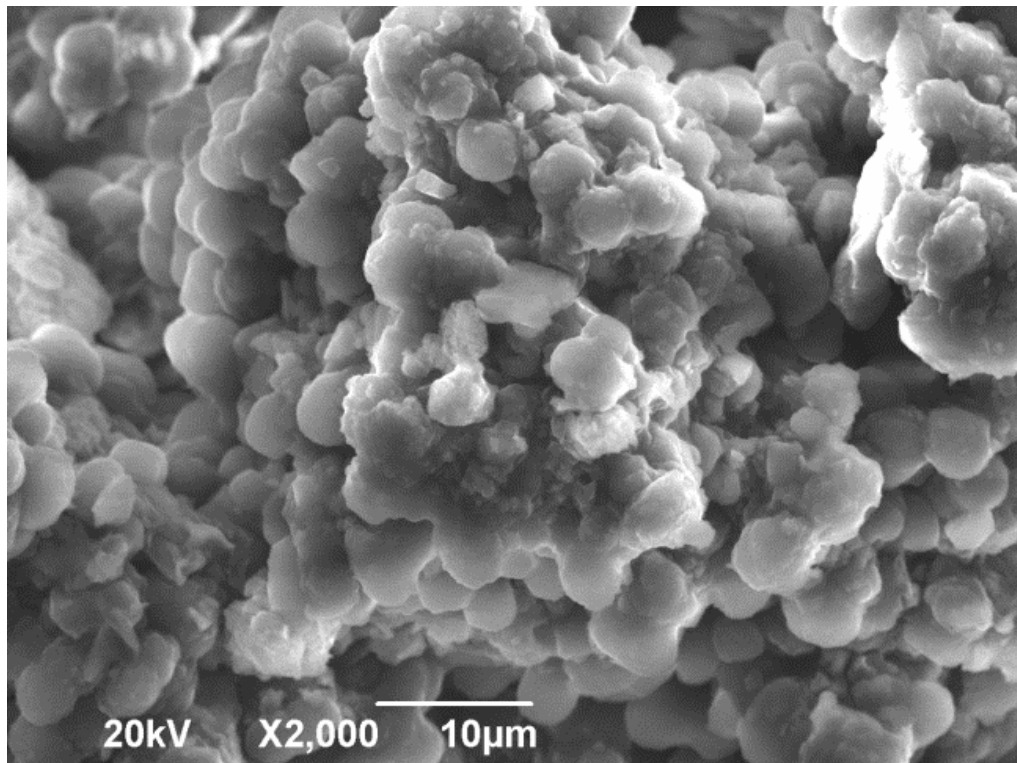


Рис. 5. Электронное фото пористого заполнителя состава №2, выполненное с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-6390A. Увеличение: x2000

Обсуждение результатов

Исследованные пористые заполнители составов №1 и №2 имеют все признаки по насыпной плотности, соответствующие марке М350 с теплопроводностью менее $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ [1]. Наиболее благоприятным сочетанием компонентов отличается состав №2, марка у которого М350, как и у состава №1, однако прочность выше у состава №2. Образец с гармоничным составом №2 отображен на рис. 4.

На рис. 4 видно, что на внешней конфигурации исследуемого образца, созданного из оптимальной композиции, пористость значительно меньше идентифицирована и активирована по сравнению с внутренней пористой структурой образца, что, по-видимому, ассоциируется с тем, что в образце глубинная пористость образована из изолированных пор (замкнутых), не выходящих на поверхность изделия.

Эффективная изоляционная результативность заполнителя объясняется образованием закрытой пористости, а также вариантами и категориями пор. Заполнители гарантируют исключительную теплоизоляционную эффективность за счет обилия заблокированных пор и наличия в них воздуха.

На электронном фото заполнителя (см. рис. 5) состава №2 видны повышенная концентрация закрытых пор и взаимоотношение их с твердой частью. Общепризнанная систематизация пор на данный момент не сформирована, так как даже дифференциация пор для разнотипных керамических продуктов является сложным процессом [1, 2, 18, 19].

На образце анализируемого состава с оптимальными характеристиками, который содержит шлак в количестве 75 %, можно заметить преимущественно поры щелеобразные (щелевидные), изотермические [1, 6, 12, 20, 21] и, если употреблять специфические термины профессора Павлова В.Ф., поры причудливой формы [22].

Шлак, внедренный в жидкостекольные композиции в оптимальной концентрации (75 %), плавно интегрируется в жидкостекольную коллоидную матрицу, при этом матрица сохраняется стабильной и не деформируется [1, 3, 6, 12]. Если уровень концентрации шлака перейдет за критическую черту, то жидкостекольная композиция

начнет генерировать коагулянты с сепарированной водной составляющей путем формирования кремнегеля, который спровоцирует вредоносное воздействие на процесс вспучивания пористого изделия [19, 23, 24].

ВЫВОДЫ

1. Исследованные пористые заполнители, которые формируют композиции, включающие соответственно 50 и 75 % шлаков, обладают характеристиками по насыпной плотности, соответствующими марке М350, и теплопроводностью менее 0,25 Вт/(м·°С).

2. Выявлено, что гармоничному сочетанию компонентов в первую очередь отвечает состав №2 (75 % шлака), марка у которого М350, как и у состава №1, содержащего 50 % шлака, но тем не менее в конечном счете прочность выше у состава №2.

3. Установлено, что пористость поверхностная изделия оптимального состава отличается от внутренней пористости, т.е. используемый шлак способствует образованию изолированных пор в заполнителе. Шлак гарантирует исключительную теплоизоляционную эффективность за счет обилия заблокированных пор и наличия в них воздуха.

4. Исследования показали, что на образце из анализируемого оптимального состава образуются преимущественно поры щелеобразные (щелевидные), изотермические и, если употреблять специфические термины профессора Павлова В.Ф., поры причудливой формы.

Список литературы

1. Абдрахимов, В.З. Влияние арсилитоподобных отходов флотации углеобогащения на структуру пористости теплоизоляционного материала / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.7 // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – №1. – С. 71–91.

2. Нимчик, А.Г. Структурообразование и свойства пористого заполнителя на основе техногенных отходов / А.Г. Нимчик, Х.Л. Усманов, З.Р. Кадырова, Ф.Г. Хомидов // Новые огнеупоры. – 2020. – №11. – С. 27–30. – URL: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2022-11-27-31>

3. Абдрахимов, В.З. Рециклинг сланцевого кокса в производство теплоизоляционных материалов на основе жидкостекольных композиций / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.52351/00232815_2024_2_41 // Кокс и химия. – 2024. – №2. – С. 41–47.

4. Мирюк, О.А. Влияние наполнителей на свойства жидкостекольных композиций / О.А. Мирюк. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.5915 // Известия вузов. Химия и химические технологии. – 2019. – Т. 62, вып. 12. – С. 51–56.

5. Figovsky, O. Advanced nanomaterials based on soluble silicates / O. Figovsky, P. Kardashev // Journal «Scientific Israel – Technological Advantages». – 2014. – Vol.16, No.3. – P. 38–76.

6. Абдрахимова, Е.С. Пористый заполнитель на основе аспирационной пыли от феррохрома и жидкостекольной композиции / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_2 // Экология промышленного производства. – 2023. – №1. – С. 2–6.

7. Абдрахимов, В.З. Использование отходов цветной металлургии и ортофосфорной кислоты в производстве жаростойкого бетона / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.42-48 // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – №2. – С. 42–48.

8. Хлыстов, А.И. Жаростойкие бетоны на основе отходов промышленности Самарской области / А.И. Хлыстов. – Самара: АСА СамГТУ, 2017. – 171 с.

9. Абдрахимов, В.З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07 // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 82-95.

10. Ульянова, Т.М. Роль наноструктурных модификаторов при получении композиционной корундовой керамики / Т.М. Ульянова // Вестник национальной академии наук. Серия химические науки. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 400–414. – URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-400-414>
11. Абдрахимова, Е.С. Основы технической керамики / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. – Усть-Каменогорск : Восточно-Казахстанский государственный технический университет, 2001. – 161 с.
12. Абдрахимов, В.З. Получение огнеупорного пористого заполнителя на основе алюмосодержащего шлака и жидкостекольной композиции / В.З. Абдрахимов. – DOI: 10.32683/0536-1052-2023-772-4-24-34 // Известия вузов. Строительство. – 2023. – №4. – С. 24–34.
13. Комиссаренко, Б.С. Эффективный жаростойкий заполнитель / Б.С. Комиссаренко, С.А. Мизюряев, А.Ю. Жигулина // Композиционные строительные материалы. Теория и практика : сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Часть 1. – Пенза, 2000. – С.140–142.
14. Жигулина, А.Ю. Жаростойкий пористый заполнитель на основе силикатнатриевой композиции : автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.Ю. Жигулина. – Самара : СГАСУ, 2004. – 18 с.
15. Жигулина, А.Ю. Выбор строительных материалов для улучшения комфорта и экологической безопасности жилья / А.Ю. Жигулина, Н.Г. Чумаченко // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2015. – № 4 (21). – С. 94–99.
16. Толкачева, А.С. Технология керамики для материалов электронной промышленности / А.С. Толкачева, И.А. Павлова. – Екатеринбург : Уральский университет, 2019. – 124 с.
17. Пат. 2426710. С1 С04В 38/06. Способ получения пористого заполнителя / Абдрахимов В.З., Семенычев В.К., Куликов В.А., Абдрахимова Е.С. Заявл. 27.04.2010. Оpubл. 20.08.2011. Бюл. №23.
18. Майоров, Д.В. К вопросу о корректности интерпретации экспериментальных данных по распределению пор / Д.В. Майоров, Т.Т. Горбачева, Ю.О. Веляев // Приборостроение физико-химической биологии. – 2020. – Т. 30, №2. – С. 17–26.
19. Лотов, В.А. Механизм твердения модифицированного жидкостекольного вяжущего и композиционные материалы на его основе / В.А. Лотов, Ш.А. Хабибулин // Химия и химическая технология. Известия ВУЗов. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 46–50.
20. Demin, V.A. The influence of heat release on the dynamics of a porous material saturation in the course of gaseous silicon condensation / V.A. Demin, B.S. Maryshev, A.I. Menshikov. – DOI: 10.1088/1742-6596/2317/1/012006 // IOP-Publishing. Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2317. – P. 012006.
21. Klimenko, L.S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method / L.S. Klimenko, B.S. Maryshev. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.122644// Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 381. – P. 122644.
22. Павлов, В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики / В.Ф. Павлов. – Москва : Стройиздат, 1977. – 240 с.
23. Абдрахимова, Е.С. Высокопористый теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Физика и химия стекла. – 2017. – Т. 43, №2. – С. 222–230.
24. Лотов, В.А. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов / В.А. Лотов, Ш.А. Хабибулин // Строительные материалы. – 2015. – № 1. – С. 73–77.

References

1. Abdrakhimov, V.Z. The influence of argillite-like waste from coal enrichment flotation on the porosity structure of thermal insulation material / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.7 // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2025. – No. 1. – P. 71–91.

2. Nimchik, A.G. Structure formation and properties of porous aggregate based on man-made waste / A.G. Nimchik, Kh.L. Usmanov, Z.R. Kadyrova, F.G. Khomidov // *New refractories*. – 2020. – No. 11. – P. 27–30. – URK: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2022-11-27-31>
3. Abdrakhimov, V.Z. Recycling of shale coke in the production of thermal insulation materials based on liquid glass compositions / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.52351/00232815_2024_2_41 // *Coke and Chemistry*. – 2024. – No. 2. – P. 41–47.
4. Miryuk, O.A. The effect of fillers on the properties of liquid glass compositions / O.A. Miryuk. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.5915 // *Izvestiya vuzov. Chemistry and chemical technologies*. – 2019. – Vol. 62, iss. 12. – P. 51–56.
5. Figovsky, O. Advanced nanomaterials based on soluble silicates / O. Figovsky, P. Kardashev // *Journal «Scientific Israel – Technological Advantages»*. – 2014. – Vol.16, No.3. – P. 38–76.
6. Abdrakhimova, E.S. Porous filler based on aspiration dust from ferrochrome and liquid glass composition / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_2 // *Ecology of industrial production*. – 2023. – No. 1. – P. 2–6.
7. Abdrakhimov, V.Z. The use of non-ferrous metallurgy waste and orthophosphoric acid in the production of heat-resistant concrete / V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.42-48 // *Industrial and civil engineering*. – 2021. – No. 2. – P. 42–48.
8. Khlystov, A.I. Heat-resistant concretes based on industrial waste from the Samara region / A.I. Khlystov. – Samara : ASA SamSTU, 2017. – 171 p.
9. Abdrakhimov, V.Z. The use of metallurgical calcium-, aluminum- and iron-containing slags in the production of heat-resistant concrete based on orthophosphoric acid / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07 // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 82–95.
10. Ulyanova T.M. The role of nano-structural modifiers in production of composite corundum ceramics / T.M. Ulyanova // *Bulletin of the National Academy of Sciences. Chemical Sciences series*. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 400–414. – URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-400-414>
11. Abdrakhimova, E.S. Fundamentals of technical ceramics / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov. – Ust-Kamenogorsk : East Kazakhstan State Technical University, 2001. – 161 p.
12. Abdrakhimov, V.Z. Obtaining a refractory porous filler based on aluminum-containing slag and a liquid-glass composition / V.Z. Abdrakhimov. – DOI: 10.32683/0536-1052-2023-772-4-24-34 // *Izvestiya vuzov. Construction*. – 2023. – No. 4. – P. 24–34.
13. Komissarenko, B.S. Effective heat-resistant filler / B.S. Komissarenko, S.A. Mityuryaev, A.Yu. Zhigulina // *Composite building materials. Theory and practice. Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference. Part 1*. – Penza, 2000. – P.140–142.
14. Zhigulina, A.Yu. Heat-resistant porous filler based on a sodium silicate composition : Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Sciences / A.Yu. Zhigulina. – Samara : SSASU, 2004. – 18 p.
15. Zhigulina, A.Yu. The choice of building materials to improve the comfort and environmental safety of housing / A.Yu. Zhigulina, N.G. Chumachenko // *Herald of the SSASU. Urban planning and architecture*. – 2015. – No. 4 (21). – P. 94–99.
16. Tolkacheva, A.S. Ceramics technology for electronic industry materials / A.S. Tolkacheva, I.A. Pavlova. – Ekaterinburg : Ural University, 2019. – 124 p.
17. Pat. 2426710. C1 C04B 38/06. Method of obtaining porous aggregate / Abdrakhimov V.Z., Semenychev V.K., Kulikov V.A., Abdrakhimova E.S. Application 04/27/2010. Published on 08/20/2011. Byul. No. 23.
18. Mayorov, D.V. On the question of the correctness of interpretation of experimental data on pore distribution / D.V. Mayorov, T.T. Gorbacheva, Yu.O. Velyaev // *Instrumentation of physico-chemical biology*. – 2020. – Vol. 30, No. 2. – P. 17–26.

19. Lotov, V.A. The mechanism of hardening of modified liquid glass binder and composite materials based on it / V.A. Lotov, Sh.A. Khabibulin // Chemistry and chemical Technology. Izvestiya VUZov. – 2015. – Vol. 58, No. 2. – P. 46–50.
20. Demin, V.A. The influence of heat release on the dynamics of a porous material saturation in the course of gaseous silicon condensation / V.A. Demin, B.S. Maryshev, A.I. Menshikov. – DOI: 10.1088/1742-6596/2317/1/012006 // IOP-Publishing. Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2317. – P. 012006.
21. Klimenko, L.S. Numerical simulation of microchannel blockage by the random walk method / L.S. Klimenko, B.S. Maryshev. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.122644// Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 381. – P. 122644.
22. Pavlov, V.F. Physico-chemical bases of firing of construction ceramics products / V.F. Pavlov. – Moscow : Stroyizdat, 1977. – 240 p.
23. Abdrakhimova, E.S. Highly porous thermal insulation material based on liquid glass / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Physics and chemistry of glass. – 2017. – Vol. 43, No. 2. – P. 222–230.
24. Lotov, V.A.. The use of modified liquid glass binder in the production of building materials / V.A. Lotov, Sh.A. Khabibulin // Building materials. – 2015. – No. 1. – P. 73–77.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Ерошкина Надежда Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Коровкин Марк Олимпиевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии строительных
материалов и деревообработки»

Харнаев Андрей Вячеславович,
аспирант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

Шульте Ирина Сергеевна,
магистрант кафедры «Технологии
строительных материалов
и деревообработки»

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Eroshkina Nadezhda Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology of Building
Materials and Wood Processing»
E-mail: n_eroshkina@mail.ru

Korovkin Mark Olimpiyevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the department «Technology of Building
Materials and Wood Processing»

Kharnaev Andrey Vyacheslavovich,
Postgraduate of the department «Technology
of Building Materials and Wood Processing»

Shulte Irina Sergeevna,
Master's degree student of the department
«Technology of Building Materials and Wood
Processing»

ВЛИЯНИЕ ВИДА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ГЕОПОЛИМЕРНОГО БЕТОНА

Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, А.В. Харнаев, И.С. Шульте

Исследовано влияние различных видов щебня на основные свойства геополлимерного бетона – удобоукладываемость, прочность на сжатие и изгиб, стойкость к ударным воздействиям, водопоглощение. Установлено, что использование рециклингового заполнителя, полученного дроблением бетонного лома, взамен гранитного щебня приводит к повышению водопотребности бетонной смеси и водопоглощения бетона, но позволяет повысить прочность на сжатие и изгиб, стойкость к ударным воздействиям. Полученные результаты подтверждают перспективность использования вторичного заполнителя, полученного дроблением бетонного лома, в производстве геополлимерных бетонов.

Ключевые слова: геополлимерный бетон, бетонный лом, рециклинговый щебень, гранитный щебень, прочность, стойкость к ударным воздействиям

THE INFLUENCE OF COARSE AGGREGATE ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE

N.A. Eroshkina, M.O. Korovkin, A.V. Kharnaev, I.S. Shulte

The influence of various types of crushed stone on the key properties of geopolymer concrete – workability, flexural and compressive strength, impact resistance, and water absorption – has been studied. It is found that using recycled aggregate obtained by crushing concrete scrap instead of granite crushed stone increases the water requirement of the concrete mix and its water absorption, but improves its strength and impact resistance. The results confirm the potential of using recycled aggregate obtained by crushing concrete blocks in the production of geopolymer concrete.

Keywords: geopolymer concrete, concrete scrap, recycled concrete aggregate, granite coarse aggregate, strength, impact resistance

Введение. Развитие строительной отрасли в настоящее время сопряжено с решением нескольких глобальных проблем [1], обусловленных ограниченностью минерально-сырьевой базы, негативным влиянием на окружающую среду, необходимостью утилизации растущего количества отходов сноса и др.

Производство портландцемента – вяжущего материала, доминирующего в современном строительстве, – является одним из основных источников антропогенных выбросов углекислого газа. Использование в технологии цемента пуццолановых и гидравлических добавок не позволяет значительно снизить выбросы в атмосферу этого парникового газа [2]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на поиск экологичных и ресурсосберегающих альтернатив портландцементу. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка геополимерных бетонов. Геополимерные вяжущие, получаемые путем щелочной активации алюмосиликатного сырья (доменный гранулированный шлак, зола-унос и др.), позволяют отказаться от использования клинкера, значительно сократить углеродный след в сравнении с портландцементом [3].

Одна из важнейших проблем современного строительства – проблема утилизации отходов сноса и других строительных отходов. Объемы образования лома бетонных конструкций и их доля в отходах строительства постоянно растут [4]. Однако перспективное направление использования этих отходов в качестве рециклингового заполнителя пока не получило широкого распространения. Доля утилизации бетонного лома для производства вторичного заполнителя не велика, так как основная масса его отправляется на полигоны или используется только в качестве низкокачественного материала для дорожных оснований [5]. Сложившаяся ситуация связана с содержанием в рециклинговом щебне цементного камня, который обуславливает его низкие характеристики [6]. В то же время имеются данные о возможности эффективного применения переработанного бетонного лома в производстве самоуплотняющегося бетона [7].

Анализ научных публикаций в последнее время свидетельствует о растущем интересе к применению рециклингового заполнителя в производстве геополимерного бетона [8]. Исследования показывают, что геополимерная матрица обеспечивает лучшее сцепление с поверхностью вторичного заполнителя по сравнению с традиционной цементной, что обусловлено способностью геополимерного геля проникать в поры старого цементного камня и формировать более плотную зону контакта [9]. Однако замена природного заполнителя на вторичный неизбежно влечет за собой изменение свойств геополимерного бетона. Установлено, что увеличение доли вторичного щебня приводит к снижению прочности на сжатие и изгибе, росту водопоглощения и усадочных деформаций. Степень этих изменений зависит как от процентного содержания вторичного заполнителя, так и от его фракционного состава: мелкие фракции в большей степени влияют на прочностные характеристики, но могут способствовать снижению усадки. Критической зоной, определяющей поведение материала под нагрузкой, является контактная зона между цементным камнем на поверхности вторичного заполнителя и новой геополимерной матрицей.

Несмотря на накопленные научные данные, многие вопросы остаются недостаточно изученными. В частности, требует уточнения характер влияния различного вида природного заполнителя при его замещении на вторичный щебень на физико-механические свойства геополимерного бетона, включая ударную прочность, которая редко рассматривается в существующих работах.

Целью исследований являлось изучение влияния замены природного заполнителя на вторичный щебень из лома бетонных конструкций на свойства геополимерного бетона в сравнении с крупным заполнителем на основе гранита, известняка и доломита.

Методы и материалы. В качестве сырья для приготовления геополимерного вяжущего использовались два компонента: измельченная магматическая горная порода (отсев дробления гранита) и доменный гранулированный шлак.

Шлак вводился в состав вяжущего в количестве 35 % от объема гранита. Для активации процесса твердения использовался раствор щелочного активатора, состоящий из жидкого натриевого стекла с силикатным модулем $n = 2,6$ и плотностью $1,45 \text{ г/см}^3$ и гидроксида натрия (NaOH).

В качестве заполнителей исследовались мелкий заполнитель – полевошпатовый песок с модулем крупности 2,3 – и крупный природный или вторичный заполнитель фр. 5-10 мм. Исследования проводились с применением трех видов природных заполнителей – гранитного, известнякового и доломитового щебня. Марка этих щебней по дробимости – 1400, 1200 и 800 соответственно.

Вторичный щебень получали трехкратным дроблением по «мягкому режиму» [10] образцов бетонных конструкций (класс бетона В30–В40) и последующим отделением фракции 5-10 мм. Водопоглощение вторичного щебня составляло 7,5 %, плотность – 2420 кг/м^3 , а марка по дробимости – 600.

Составы исследованных бетонов приведены в таблице.

Составы исследованных бетонов

Наименование материалов	Расход материалов, кг/м^3			
	1-й состав	2-й состав	3-й состав	4-й состав
Гранит измельченный	310	310	310	310
Доменный гранулированный шлак	176	176	176	176
Щебень гранитный фр. 5-10 мм	962	–	–	–
Щебень доломитовый фр. 5-10 мм	–	976	–	–
Щебень известняковый фр. 5-10 мм	–	–	908	–
Щебень вторичный фр. 5-10 мм	–	–	–	835
Песок	728	728	728	728
Жидкое стекло	136	136	136	136
Вода	93	93	93	93
NaOH	14	14	14	14

Для получения бетонной смеси компоненты вяжущего сначала перемешивались между собой в сухом виде, затем в них вводился раствор активатора твердения, и на последней стадии в вяжущее тесто добавлялись мелкий и крупный заполнители.

Бетонная смесь укладывалась в формы, уплотнялась на виброплощадке. После уплотнения образцы в формах сутки хранились в нормальных условиях, а затем распалубливались. Часть образцов оставляли твердеть в нормальных условиях, а часть – подвергали тепловлажностной обработке по режиму 3 часа – подъем температуры, 8 часов – изотермическая выдержка при температуре 80°C и оставшееся время – охлаждение. Исследовалось влияние одного и трех циклов тепловой обработки.

Для оценки свойств геополимерного бетона использовались стандартные методы испытаний. Удобоукладываемость бетонной смеси определялась по распылу конуса (РК) в соответствии с ГОСТ 310.4-81. Для оценки прочности на изгиб, сжатие и водопоглощения были изготовлены образцы-призмы с размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$, которые сначала испытывали на изгиб или водопоглощение, а затем на половинках, оставшихся после испытания на изгиб, определялась прочность на сжатие. Для оценки ударной прочности изготавливались образцы-кубы с длиной ребра 70 мм. При испытании фиксировалось количество ударов о поверхность образца, вызывающих появление первой видимой трещины на образце. Водопоглощение определялось по ГОСТ 12730.3-2020. Образцы высушивались до постоянной массы при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, затем насыщались водой до постоянной массы.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Влияние вида заполнителя на подвижность смеси. На рис. 1 представлены значения распыла конуса для исследованных составов. Наибольшая подвижность зафиксирована для состава с гранитным щебнем (152 мм), что обусловлено гладкой

поверхностью гранитных зерен и их правильной геометрической формой, обеспечивающей минимальное трение при течении смеси. Состав на доломитовом щебне имеет близкую схожую консистенцию – его расплыв всего на 3 мм ниже. При использовании известнякового щебня расплыв значительно снизился и составил 131 мм, что на 14 % ниже, чем у гранитного аналога, что обусловлено более развитой поверхностью известняка. Наименьший расплыв (121 мм) отмечен у состава на вторичном заполнителе, который характеризуется повышенной шероховатостью поверхности, высоким водопоглощением. Эти факторы увеличивают внутреннее трение между зернами и повышают водопотребность бетонной смеси.

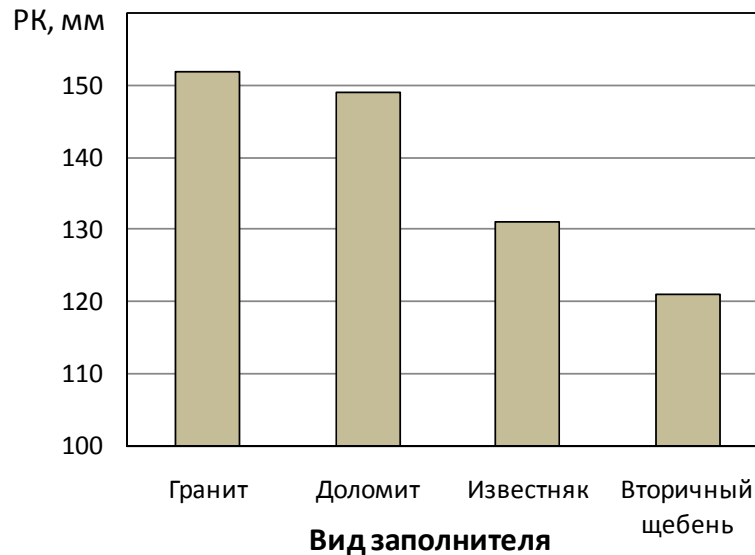


Рис. 1. Расплыв смеси исследованных составов

Применение вторичного заполнителя приводит к снижению подвижности смеси. Однако смесь при замене щебня из плотных горных пород на рециклинговый заполнитель сохраняет удобоукладываемость, приемлемую для современных способов формования железобетонных изделий.

Предел прочности на сжатие. На рис. 2 представлены результаты испытаний предела прочности на сжатие в зависимости от вида заполнителя и количества циклов тепловлажностной обработки.

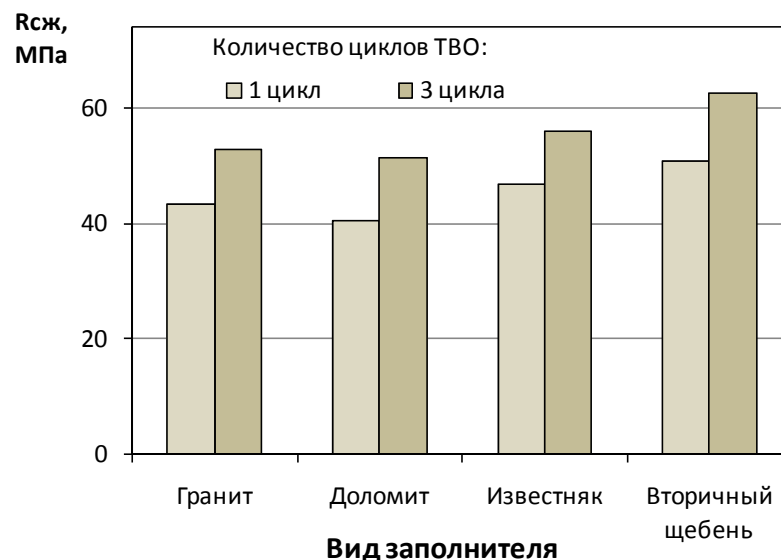


Рис. 2. Прочность на сжатие геополимерного бетона в зависимости от вида заполнителя и количества циклов тепловой обработки

После одного цикла ТВО максимальная прочность зафиксирована у состава на вторичном заполнителе – 50,8 МПа, что приблизительно на 15-20 % выше, чем у составов на заполнителях из плотных горных пород – гранита и доломита – 43,2 и 40,5 МПа соответственно. Прочность бетона на известняковом щебне занимает промежуточное положение.

После третьего цикла ТВО прочность всех составов возрастает: до 62,6 МПа у бетона на рециклинговом заполнителе, до 51-56 МПа у составов на природном щебне. Преимущество вторичного заполнителя можно объяснить его активным участием в структурообразовании. Цементный камень на поверхности вторичного щебня содержит продукты гидратации (С–S–Н-фазы, портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$, этtringит), которые в высокощелочной среде подвергаются дополнительной активации: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ взаимодействует с растворимым кремнием с образованием дополнительных С–S–Н-фаз, а алюминатсодержащие фазы участвуют в формировании гибридного геля N–(C)–A–S–H. Это приводит к формированию переходной зоны с повышенной плотностью за счет химического взаимодействия между гелем щелочеактивируемой матрицы (N–(C)–A–S–H) и продуктами гидратации цемента, а также физико-химической адгезии за счет шероховатой поверхности, увеличивающей площадь контакта.

При твердении в нормальных условиях (рис. 3) характер зависимостей прочности от вида заполнителя сохраняется. Состав на вторичном заполнителе после твердения в течение 28 сут набирает прочность 50,0 МПа, а через 28 суток после ТВО приобретает прочность 59,0 МПа. Составы, изготовленные с применением гранитного и доломитового щебня при твердении в нормальных условиях, также имеют прочность меньшую, чем бетон на вторичном заполнителе.

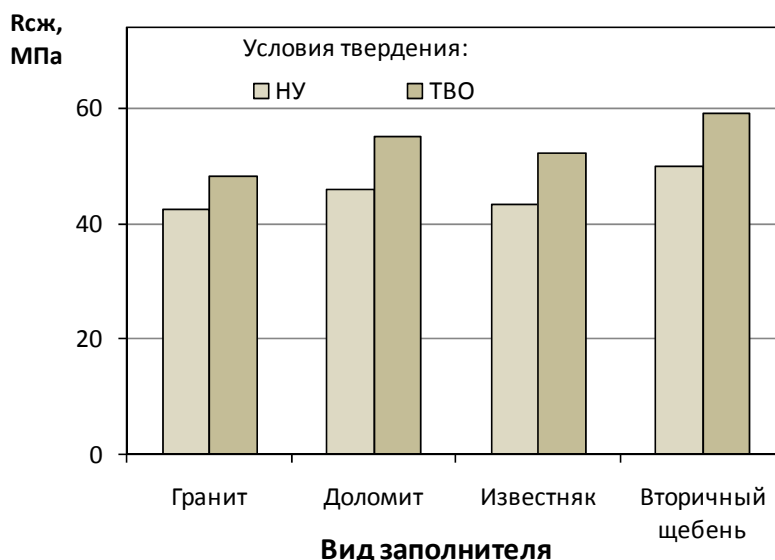


Рис. 3. Прочность на сжатие геополимерного бетона в зависимости от вида заполнителя при твердении в нормальных условиях и после ТВО

Особый интерес представляет соотношение прочности после ТВО и при нормальном твердении. Прочность состава после ТВО превышает 28-суточную прочность при нормальных условиях, что подтверждает эффективность термообработки для активации процессов твердения геополимерного вяжущего.

Предел прочности на изгиб. Результаты испытаний на изгиб (рис. 4) коррелируют с данными по сжатию, однако демонстрируют более выраженную чувствительность к свойствам контактной зоны «матрица – заполнитель».

Повышенная прочность на изгиб составов с вторичным заполнителем объясняется:

– механическим зацеплением – шероховатая поверхность вторичного щебня обеспечивает более эффективное перераспределение напряжений в зоне контакта;

– химической совместимостью – наличие цементного камня на поверхности вторичного щебня способствует диффузии ионов и формированию непрерывной структуры на границе раздела фаз;

– морфологией контактной зоны – микротрещины и поры на поверхности вторичного заполнителя заполняются продуктами гелеобразования, что снижает концентрацию напряжений при изгибе.

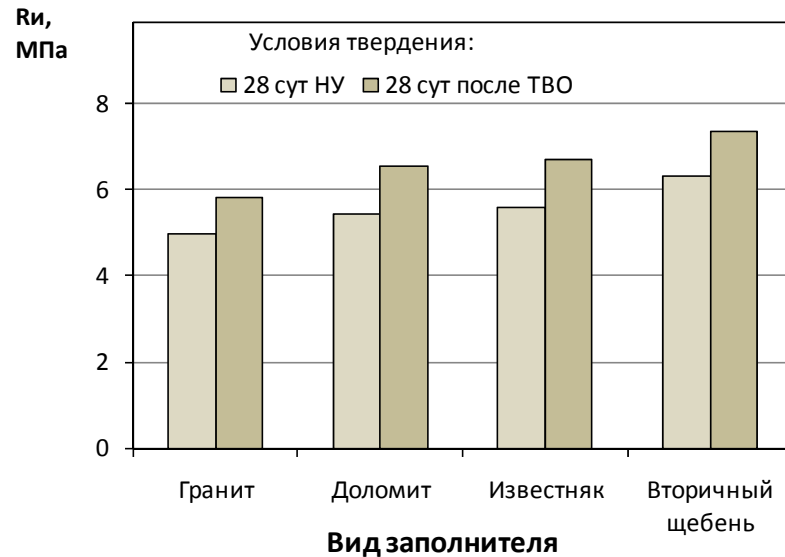


Рис. 4. Прочность на изгиб геопалимерного бетона в зависимости от вида заполнителя и условий твердения

Водопоглощение. Кинетика водопоглощения представлена на рис. 5. Наименьшим водопоглощением (4,5 %) характеризуются составы на заполнителях из плотных пород – граните и доломите, что связано с отсутствием в них пор.

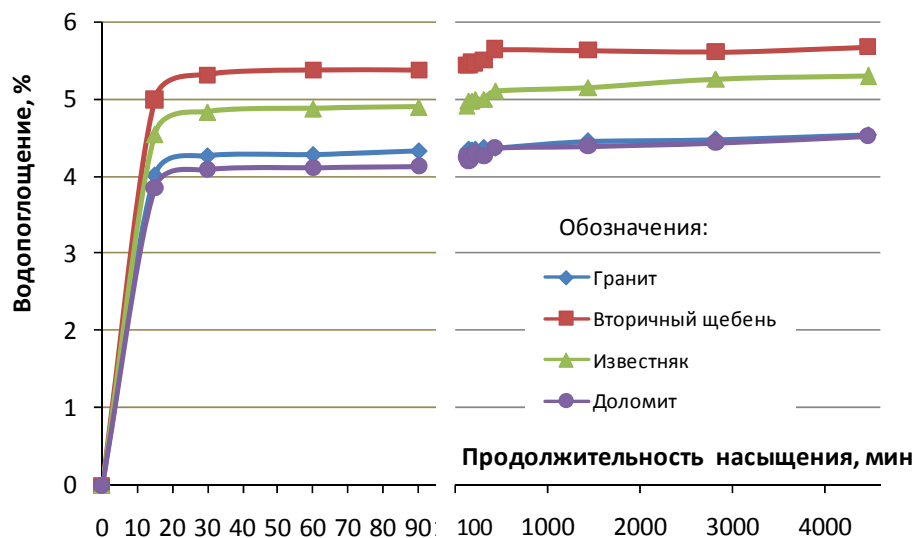


Рис. 5. Кинетика водопоглощения геопалимерного бетона, изготовленного с применением различных заполнителей

У состава на вторичном заполнителе водопоглощение составляет 5,7 %, что на 27 % выше, чем у составов на гранитном и доломитовом щебне, но приблизительно соответствует значениям этого показателя для обычных портландцементных бетонов. Повышенное водопоглощение вторичного заполнителя обусловлено наличием

открытых пор в цементном камне, который в значительном количестве содержится в рециклинговом щебне.

Важно отметить, что за первые 30 мин водопоглощение геополимерного бетона достигает значений, составляющих 90-95 % от итоговых значений. Такая кинетика водопоглощения характеризует поровую структуру геополимерной матрицы как структуру, состоящую преимущественно из сообщающихся пор.

Стойкость ударным воздействиям. Результаты испытаний ударной прочности (рис. 6) показывают значительное преимущество составов со вторичным и доломитовым заполнителями. Максимальное значение 45,2 кДж/м² достигнуто для состава на доломитовом щебне, что объясняется высокой вязкостью доломита и его способностью к пластической деформации перед разрушением. Состав на вторичном заполнителе показал 43,2 кДж/м², что на 55 % выше, чем у состава бетона на гранитном щебне (27,8 кДж/м²). Состав на известняковом щебне занял промежуточное положение (32,5 кДж/м²).

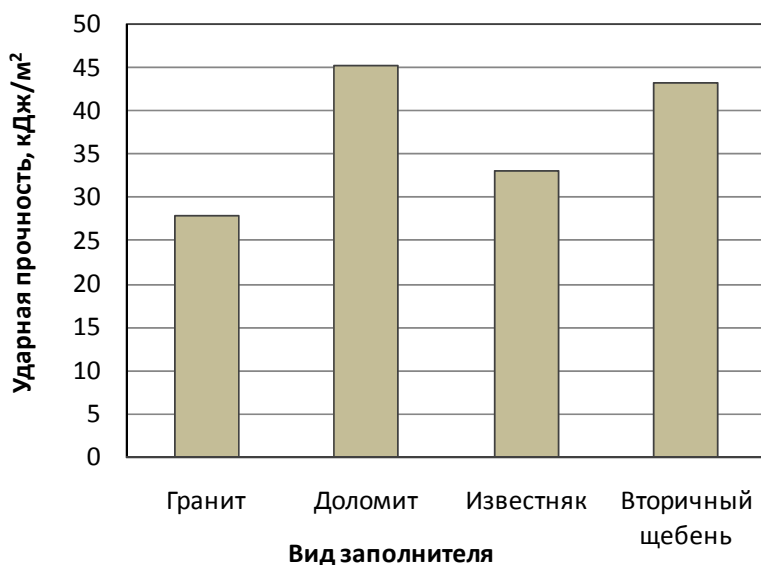


Рис. 6. Ударная прочность геополимерного бетона, изготовленного с применением различных видов заполнителя

Полученные результаты показывают, что вторичный заполнитель, несмотря на то что его прочность ниже прочности гранитного щебня, способствует значительному повышению ударной вязкости. Это объясняется:

- энергоемкостью разрушения – наличие микротрещин и пор в структуре вторичного щебня способствует рассеиванию энергии удара в результате ветвления трещин, увеличения площади разрушения и поглощения энергии за счет пластических деформаций в остаточном цементном камне;

- прочностью контактной зоны – высокая адгезия между матрицей и заполнителем обеспечивает эффективную передачу нагрузки и предотвращает преждевременное разрушение зоны контакта геополимерной матрицы и заполнителя;

- демпфирующей способностью – цементный камень на поверхности вторичного щебня обладает более низким модулем упругости по сравнению с гранитом, что обеспечивает дополнительное поглощение энергии при ударных нагрузках.

Анализ полученных результатов. Обобщая полученные экспериментальные данные, можно сформулировать следующие закономерности влияния вида заполнителя на свойства щелочеактивируемого материала.

Вторичный заполнитель из бетонного лома обеспечивает наивысшие показатели прочности на сжатие и изгиб как после тепловлажностной обработки, так и при твердении в нормальных условиях.

По водопоглощению состав на вторичном заполнителе уступает гранитному и доломитовому аналогам, однако его значение 5,7 % находится в допустимых пределах.

Ударная прочность составов на вторичном и доломитовом заполнителях существенно превосходит показатели составов на гранитном и известняковом щебне, что открывает перспективы применения таких материалов в конструкциях, работающих при динамических нагрузках (фундаменты под оборудование, транспортные сооружения, защитные экраны).

С точки зрения экологической эффективности замена природного щебня на вторичный позволяет:

- сократить потребление невозобновляемых природных ресурсов;
- снизить объемы захоронения строительных отходов;
- уменьшить транспортные затраты при наличии локальных источников переработанного бетона.

Однако при оценке экологического баланса следует учитывать, что производство щелочного активатора (гидроксид натрия, натриевое стекло) является энергоемким процессом, что частично нивелирует экологические преимущества, связанные с заменой портландцемента. Полная оценка экологической эффективности требует применения методологии оценки жизненного цикла, учитывающей все стадии – от добычи сырья до утилизации материала после эксплуатации.

Полученные прочностные характеристики (50,8-62,5 МПа после ТВО) превышают или сопоставимы с прочностью бетона (В30-В40), из которого был получен вторичный заполнитель. Это подтверждает, что геополимерная матрица способна не только компенсировать снижение прочности, связанное с использованием вторичного заполнителя, но и обеспечить более высокие показатели по сравнению с гранитным составом.

Выводы.

1. Разработан состав геополимерного материала на основе композиционного вяжущего из гранитного отсева и доменного гранулированного шлака в соотношении 65:35 по массе с использованием щелочного активатора (натриевое стекло с модулем $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,6$ по массе + 12 М раствор NaOH), что соответствует области формирования плотной аморфной алюмосиликатной структуры по классификации Давидовича [11] и обеспечивает оптимальные условия для протекания реакций поликонденсации.

2. Использование вторичного щебня фр. 5-10 мм из бетонного лома класса В30–В40 позволяет получить материал с пределом прочности на сжатие 50,2 МПа после тепловлажностной обработки, что на 15-20 % выше, чем у составов на заполнителях из плотных горных пород – гранита и доломита – 43,2 и 40,5 МПа соответственно. Предел прочности на изгиб достигает 6,3-7,4 МПа, что на 26,0 % выше аналогичного показателя состава на гранитном щебне.

3. Водопоглощение материала на вторичном заполнителе составляет 5,7 %, что незначительно превышает показатель гранитного состава (4,5 %), однако остается приемлемым для конструкционного бетона.

4. Ударная прочность материала со вторичным заполнителем составляет 43,2 кДж/м², что на 55 % выше, чем у состава с гранитным щебнем (27,8 кДж/м²), что свидетельствует о высокой вязкости разрушения материала и его пригодности для конструкций, работающих при динамических нагрузках.

5. Полученные результаты подтверждают перспективность вовлечения вторичного заполнителя из бетонного лома в производство геополимерных бетонов, что позволяет одновременно решить задачи ресурсосбережения, утилизации строительных отходов и получения высококачественных композиционных материалов. Данные экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами работ других авторов [6, 8, 9], подтверждающими, что при рациональном подборе состава матрицы и режима

твердения вторичный наполнитель может не уступать природному, а по ряду показателей даже превосходить его.

Список литературы

1. Papamichael, I. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review / I. Papamichael, I. Voukkali, P. Loizia, A.A. Zorpas // *Waste Management & Research*. – 2023. – Vol. 41, №. 12. – P. 1728–1740.
2. Брыков, А.С. Вяжущие системы щелочной гидратации. Часть I / А.С. Брыков // *Цемент и его применение*. – 2021. – №. 2. – С. 84–87.
3. Hassan, A. Use of geopolymers for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure / A. Hassan, M. Arif, M. Shariq // *Journal of cleaner production*. – 2019. – Vol. 223. – P. 704–728.
4. Bonifazi, G. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling / G. Bonifazi [et al.] // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2025. – Vol. 53. – P. 101032.
5. Гусев, Б.В. Вторичное использование бетонов / Б.В. Гусев, В.А. Загурский. – Москва : Стройиздат, 1988. – 96 с.
6. Wang, D. Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review / D. Wang, C. Lu, Z. Zhu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – e02384. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02384>.
7. Свойства самоуплотняющегося бетона, изготовленного с применением продуктов переработки бетонного лома / М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.Ю. Егоров, А.И. Шестернин. – DOI 10.54734/20722958_2023_4_115 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2023. – № 4(57). – С. 115–121.
8. Nikmehr, B. A state-of-the-art review on the incorporation of recycled concrete aggregates in geopolymer concrete / B. Nikmehr, R. Al-Ameri // *Recycling*. – 2022. – Vol. 7, №. 4. – P. 51.
9. Thomas, B.S. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review / B.S. Thomas, J. Yang, A. Bahurudeen, S.N. Chinnu // *Cleaner Materials*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100056.
10. Коровкин, М. О. Использование дробленого бетонного лома в качестве наполнителя для самоуплотняющегося бетона / М.О. Коровкин, А.И. Шестернин, Н.А. Ерошкина // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 3(37). – С. 85.
11. Davidovits, J. Geopolymer. Chemistry and applications / J. Davidovits. – Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2015. – 644 pp.
12. Memon, M.A. Effect of Recycled Coarse Aggregates (RCA) on Geo-Polymer-Based Concrete / M.A. Memon, B.A. Memon, S.K. Jamali [et al.] // *Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology*. – 2023. – Vol. 13, №. 2. – P. 49–54.

References

1. Papamichael, I. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review / I. Papamichael, I. Voukkali, P. Loizia, A.A. Zorpas // *Waste Management & Research*. – 2023. – Vol. 41, №. 12. – P. 1728–1740.
2. Brykov, A.S. Alkali-activated materials. Part I / A.S. Brykov // *Cement and Its Applications* – 2021. – No. 2. – P. 84–87.
3. Hassan, A. Use of geopolymers for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure / A. Hassan, M. Arif, M. Shariq // *Journal of cleaner production*. – 2019. – Vol. 223. – P. 704–728.
4. Bonifazi, G. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling / G. Bonifazi [et al.] // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2025. – Vol. 53. – P. 101032.
5. Gusev, B.V. Secondary use of concrete / B.V. Gusev, V.A. Zagursky. – Moscow : Stroyizdat, 1988. – 96 p.

6. Wang, D. Mechanical performance of recycled aggregate concrete in green civil engineering: Review / D. Wang, C. Lu, Z. Zhu [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – e02384. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02384>.
7. Properties of self-compacting concrete made using products of processing concrete scrap / M.O. Korovkin, N.A. Eroshkina, A.Yu. Egorov, A.I. Shesternin. – DOI 10.54734/20722958_2023_4_115 // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No 4(57). – P. 115–121.
8. Nikmehr, B. A state-of-the-art review on the incorporation of recycled concrete aggregates in geopolymer concrete / B. Nikmehr, R. Al-Ameri // *Recycling*. – 2022. – Vol. 7, №. 4. – P. 51.
9. Thomas, B.S. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review / B.S. Thomas, J. Yang, A. Bahurudeen, S.N. Chinnu // *Cleaner Materials*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100056.
10. Korovkin. M.O. The use of crushed concrete scrap as filler for self-compacting concrete / M.O. Korovkin, A.I. Shesternin, N.A. Eroshkina // *Inzhenernyj vestnik Dona*. – 2015. – № 3(37). – P. 85.
11. Davidovitch, J. Geopolymer. Chemistry and applications / J. Davidovitch. – Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2015. – 644 pp.
12. Memon, M.A. Effect of Recycled Coarse Aggregates (RCA) on Geo-Polymer-Based Concrete/ M.A. Memon, B.A. Memon, S.K. Jamali [et al.] // *Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology*. – 2023. – Vol. 13, №. 2. – P. 49–54.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Романенко Игорь Иванович,
кандидат технических наук, зав. кафедрой
«Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: miap@pguas.ru

Петровнина Ирина Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Механизация и автоматизация
производства»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

Романенко Мария Игоревна,
кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Экономика, организация
и управление производством»
E-mail: masha@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Romanenko Igor Ivanovich,
Candidate of Sciences, Head of the
Department «Mechanization and Automation
of Production»
E-mail: miap@pguas.ru

Petrovnina Irina Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Mechanization and
Automation of Production»
E-mail: irisha-vas@yandex.ru

Romanenko Maria Igorevna,
Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor of the Department «Economics,
Organization, and Management of
Production»
E-mail: masha@yandex.ru

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОНОВ

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Романенко

Исследованы физико-механические свойства композиционного безцементного вяжущего и бетонов строительного назначения на основе молотого доменного граншлака (МГШ), наполненного молотым ломом бетона на основе портландцемента (МЛБ) и тонкоизмельченным боем керамического кирпича (ТМБКК). Тонкомолотые компоненты использовали в качестве составляющей гидравлического композиционного вяжущего, активированного щелочным компонентом. Дозировка тонкомолотых компонентов в шлакощелочном вяжущем варьировалась от 10 до 60 % от массы композиционного вяжущего. Результаты исследования показали, что при дозировках более 10 % как МЛБ, так и ТМБКК прочность бетонов на сжатие увеличивается на 14,4 % через 28 дней твердения в естественных условиях относительно контрольного состава. Такое улучшение было достигнуто при добавлении по 5 % как ТМБКК, так и МЛБ. Тонкомолотые компоненты в композиционном шлакощелочном вяжущем негативно влияют на удобоукладываемость бетонной смеси, но в то же время положительно влияют на аутогенную усадку при твердении. Применение тонкомолотых модификаторов позволило получить вяжущее, альтернативное портландцементу, в результате повысилась привлекательность использования промышленных отходов в производстве материалов строительного назначения и снизилось их негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: композиты, вяжущее, шлак, лом бетона, бой глиняного кирпича, структура, прочность

COMPOSITES ON THE BASIS OF RECOVERABLE REOURCES FOR CONCRETE PRODUCTION

I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina, M.I. Romanenko

The physical and mechanical properties of a cement-free composite binder and construction concrete based on ground blast furnace slag (GBS) filled with ground Portland cement-based concrete scrap (GPC) and finely ground ceramic brick (FCC) have been studied. The finely ground waste components were used as a component of an alkali-activated hydraulic composite binder. The finely

ground components in the alkali-slag binder varied in dosage from 10 % to 60 % of the composite binder weight. The results have showed that at dosages greater than 10 % of both GPC and FCC, the compressive strength of concrete increased by 14.4 % after 28 days of natural curing relative to the control composition. This improvement is achieved with the addition of 5 % of both FCC and GPC. Finely ground components in composite slag-alkali binders negatively impact the workability of concrete mixes, but at the same time, they have a positive effect on autogenous shrinkage during hardening. The use of finely ground modifiers has made it possible to produce a binder alternative to Portland cement, thereby increasing the attractiveness of industrial waste in the production of construction materials and reducing its negative impact on the environment.

Keywords: composite, binder, slag, concrete scrap, broken clay brick, structure, strength

Введение. Существуют два способа получения вяжущего, альтернативного портландцементу: первый – применение смешанного цемента, второй – использование гранулированного доменного шлака [1], золы-уноса [2] и материалов с высоким содержанием алюмосиликатов [3]. Применение шлаков, активированных щелочами [4], снижает выбросы углекислого газа в атмосферу. Кроме того, бетоны, полученные на основе ШЩВ, характеризуются высокой долговечностью [5, 6]. При производстве бетона в качестве вяжущих веществ используются промышленные побочные продукты, такие, как микрокремнезём, летучая зола и глинозёмистый цемент [3...5]. Эти продукты могут стать основой для получения экологичных материалов строительного назначения с меньшим выбросом углекислого газа по сравнению с портландцементом. Исследователи и коммерческие организации в настоящее время сосредоточены на производстве заменителей портландцемента [7]. Свойства и возможности такого заменителя, позволяющие снизить выбросы углекислого газа и обеспечить высокую устойчивость к огню и химическому воздействию, сохраняя при этом прочность и функциональность, аналогичные портландцементу, привлекают внимание ученых все больше. Использование нескольких щелочных химических активаторов запускает химическую реакцию в различных материалах с высоким содержанием алюмосиликатов, и эта область исследований с микроструктурным анализом таких материалов является предметом различных научных работ [8]. За последние годы было проведено огромное количество исследований, посвященных разработке экологичных строительных бетонов, а также изделий на их основе [9].

Утилизация отходов строительства, реновация и снос старого и ветхого жилья являются глобальной проблемой не только в России, но и во всем мире [2...4]. Наибольшее количество строительных отходов находится в Китае [6]. В России это связано с восстановлением жилья и предприятий в Донецкой, Луганской, Запорожской и Курской областях, разрушенных в ходе проведения СВО. Основная часть строительных отходов (лом бетона, кирпичный бой) попадает на свалки и в овраги, что усугубляет экологические и экономические проблемы. В настоящее время исследователи стремятся использовать крупные фракционированные отходы в качестве заполнителей бетонных смесей и в качестве несущих слоев дорожной одежды. Однако на площадках по переработке отходов остается большое количество песка и тонкой пыли, а их не используют для дальнейшей утилизации [7, 8]. Таким образом, вторичное использование в производстве строительных материалов тонко измельченных песков и пыли на основе портландцемента и боя красного кирпича с цементно-песчаным раствором позволит сократить общее количество отходов, образующихся в результате добычи и переработки, а также улучшить состояние окружающей среды [4, 6]. Такой подход к проблеме утилизации позволяет «заставить» эти материалы вторично гидратироваться и набирать прочность в композиционном вяжущем. Образующиеся продукты гидратации идентичны продуктам гидратации портландцемента. Применяя их в шлакощелочном вяжущем (ШЩВ), можно получить новый вид вяжущего с заданными эксплуатационными свойствами, который обладает высокой реакционной способностью и при этом оказывает минимальное воздействие на окружающую среду.

Материалы и методики проведения исследований. Гранулированный доменный шлак (ГДШ) ПАО «Северсталь» после сушки до влажности 3 % подвергался помолу в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности $S_{уд}=3850 \text{ см}^2/\text{г}$. Химический состав исследуемых материалов представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Показатель/элемент	Молотый лом строительных материалов		Молотый доменный граншлак ПАО «Северсталь»
	Бетон на основе ПТЦ (МЛБ)	Керамический кирпич (ТМБКК)	МГШ
Химический состав			
SiO ₂	19,53	20,2	37,28
CaO	50,6	11,28	37,41
MgO	2,06	0,37	12,3
Al ₂ O ₃	5,75	15,92	10,29
Na ₂ O	0,13	2,95	0,672
K ₂ O	0,73	–	0,53
TiO ₂	0,38	11,17	0,46
MnO	–	–	0,43
(CaO + MgO)/(SiO ₂) – Модуль основности			
M_0	2,69	0,58	1,33
Свойства			
Истинная плотность, кг/м ³	2110	2150	2910
Влажность, %	0,19	0,27	0,9
Пористость, %	37	43	39
Удельная поверхность $S_{уд}$, см ² /г	4100	3450	3920

МЛБ образуется после дробления бетона жилых и промышленных зданий при получении фракционного щебня. Остатки песка и пыли остаются в отвале. Их применение в районе получения позволяет снизить транспортные расходы на доставку природных материалов и решить экологические проблемы в регионе.

ТМБКК был получен в результате сноса старых построек из глиняного кирпича, его дробления, сушки и помола. Химические свойства приведены в табл. 1.

В качестве химических активаторов твердения композиционного вяжущего использовали водный раствор гидроксида натрия (ВРГН) и силикат натрия (СН). Для исследований были приготовлены шлакощелочные растворы. Для этого применяли сурский песок с модулем крупности $M_{кр}=1,8 - 2,1$. Смеси готовили в лабораторном смесителе миксерного типа с регулируемым числом оборотов вала смесителя. Составы смесей приведены в табл. 2.

Проводились испытания свежеприготовленной растворной смеси на определение распылов конуса на встряхивающем столике по ГОСТ Р 58277-2018. Результаты представлены в табл. 2.

Формовались образцы балочек размером 40×40×160 мм. Отформованные образцы в формах прикрывались полиэтиленовой пленкой. После распалубки через сутки после формовки образцы твердели в камере нормального твердения при температуре $T = (25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и влажности $W = (90 \pm 5) \%$. Испытания проводились на прочность при изгибе и сжатии. Результаты испытаний физико-механических свойств растворов представлены в табл. 3.

Составы исследуемых растворов и их свойства

№ п/п	Индекс	Расход ингредиентов растворной смеси, г							Распльв, мм
		МГШ	ТМБКК, / %	МЛБ, / %	Песок	NaOH (ГН) / % от вяжущего	Na ₂ SiO ₂ ·nH ₂ O (СН) / % от вяжущего	Вода	
1	К	1500	–	–	3384	54/3,6	189,75/12,5	600	131
2	МЛБ 10	1350	–	150/10	3420	54/3,6	189,75/12,5	600	127
3	МЛБ 20	1200	–	300/20	3455	54/3,6	189,75/12,5	600	121
4	МЛБ 40	900	–	600/40	3489	54/3,6	189,75/12,5	600	110
5	МЛБ 60	300	–	1200/60	3489	54/3,6	189,75/12,5	600	100
6	ККЛБ10	1350	75/5	75/5	3420	54/3,6	189,75/12,5	600	130
7	ККЛБ20	1200	150/10	150/10	3455	54/3,6	189,75/12,5	600	129
8	ККЛБ40	900	300/20	300/20	3489	54/3,6	189,75/12,5	600	123
9	ККЛБ60	300	600/30	600/30	3489	54/3,6	189,75/12,5	600	112

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства растворов на шлакощелочном композиционном вяжущем

Возраст, сут	Составы								
	К	МЛБ 10	МЛБ 20	МЛБ 40	МЛБ 60	ККЛБ 10	ККЛБ 20	ККЛБ 40	ККЛБ 60
Прочность на изгиб, МПа									
7	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	2,8	2,6	2,2	1,8
14	2,7	2,4	2,3	2,0	1,85	3,1	2,8	2,3	2,0
28	2,9	2,6	2,4	2,2	1,9	3,3	2,86	2,6	2,4
Прочность на сжатие, МПа									
7	35,0	30,5	25,5	21,3	15,8	40,0	39,8	33,5	30,4
14	37,1	35,7	27,9	24,8	17,7	44,4	43,2	35,1	34,0
28	40,9	37,6	30,0	26,4	19,2	46,8	44,5	38,6	35,8
Величина воздушной усадки в возрасте, сут (10 ⁻⁵)									
20	200	150	165	150	140	170	162	134	125
40	225	185	190	160	170	210	185	170	136
60	240	190	200	170	175	225	190	180	150
80	248	205	220	200	180	235	205	183	160
100	250	220	225	205	185	240	215	189	160
120	255	230	233	220	190	240	220	200	160
140	260	235	240	235	200	250	225	210	165
160	270	240	248	240	210	270	234	215	170
180	275	250	260	250	215	275	240	224	175

Для оценки усадки использовали методику ГОСТ 24544-2020. Для этого формовали призмы размером 40 × 40 × 160 мм в соответствии со стандартом, на торцах которых закреплены по центру сечения стальные пластинки-маркеры.

Анализ данных табл. 3 показывает влияние содержания МЛБ в композиционном вяжущем на прочность образцов бетона на изгиб. Введение ТМБК в качестве частичной замены МГШ не оказало существенного влияния на прочность на изгиб в раннем возрасте образцов бетона на мелком заполнителе на основе МГШ, активированного щелочным активатором твердения. Однако прочность образцов в возрасте

14 и 28 суток немного возросла за счет химического состава МЛБ, способствующего образованию дополнительных продуктов реакции, повышающих прочность и плотность образцов бетона на основе МГШ [10]. Наибольшая прочность при отверждении в камере нормального твердения в возрасте 28 суток составила 2,9 МПа (контрольный состав на основе МГШ), а минимальная прочность на изгиб – 1,9 МПа (МЛБ 60), что объясняется длительным индукционным периодом и низкими темпами гидратации. В то же время высокая прочность (2,6 МПа) в возрасте 28 суток (состав МЛБ 10, см. табл. 3) обусловлена высоким содержанием кремнезема, оксида магния или оксида кальция [11].

При добавлении ТМБКК и МЛБ в качестве частичной замены МГШ в образцы, активированные щелочью, значительного повышения прочности на изгиб не наблюдалось, за исключением образцов с 5 % ТМБКК и 5 % МЛБ (состав ККЛБ 10, см. табл. 3), прочность на изгиб в возрасте 28 суток – 3,3 МПа. Добавление ТМБКК повысило прочность на изгиб по сравнению с образцами, изготовленными с использованием МГШ и МЛБ.

Прочность на сжатие у образцов с МЛБ на ранней стадии ниже, чем у эталонного образца (К). Через 28 дней образцы состава «К» показали прочность на сжатие, равную 40,9 МПа. С увеличением содержания МЛБ в композиционном шлакощелочном вяжущем прочность на сжатие бетонных образцов снижается из-за низкого содержания кремнезема [11, 12], что изменяет соотношение кальция и кремнезема. Кроме того, это влияет на образование геля алюмосиликата кальция, который может замедлять скорость ранних химических реакций [10, 13]. Однако прочность образцов бетона в возрасте 28 суток увеличилась по сравнению с 7-дневными показателями для каждой смеси на 16,86 %, 23,28 %, 17,65 %, 23,94 % и 21,52 % для составов К, МЛБ10, МЛБ20, МЛБ40 и МЛБ60 соответственно. Такое повышение прочности на сжатие можно объяснить наличием реактивного кремнезема в МЛБ, который способствовал химической реакции.

В составах ККЛБ прочность на сжатие выше, чем в составах МЛБ. Через 28 дней твердения в камере нормального твердения прочность на сжатие увеличилась на 17,0 % (46,8 МПа), 11,81 %, 15,22 % и 17,76 % для составов ККЛБ10, ККЛБ20, ККЛБ40, ККЛБ60 соответственно. Основной причиной повышения прочности является наличие большого количества хатрурита $\text{Ca}_3(\text{SiO}_5)$ в матрице связующего вещества [10]. Реактивный диоксид кремния улучшает процесс геополимеризации и добавляет кремний в полимерную цепь, повышая прочность и плотность геополимерных композиций в более поздние сроки [1, 4, 6].

Скорость усадки при высыхании была высокой в течение первых 28 дней, а затем темпы замедлились. При добавлении 10 % МЛБ усадка при высыхании на ранней стадии (через 3 дня) снизилась со 125 до 100 микрон. При увеличении количества МЛБ с 10 до 60 % усадка при высыхании уменьшилась со 100 до 90 микрон. Наконец, значения усадки при высыхании для материалов, активированных щелочью и содержащих 60 % МЛБ, снизились с 265 до 210 микрон. Установлено, что замена МГШ на МЛБ приводит к постоянному снижению усадки при высыхании для всех образцов, активированных щелочью. Достигнутое падение значений усадки при высыхании с увеличением дозы МЛБ можно объяснить образованием исключительно взаимосвязанных капиллярных сетей внутри матрицы цементного камня [11, 12].

Замена гранулированного доменного шлака МЛБ привела к изменению уровня оксида кальция в пасте из-за различных уровней оксида кальция в МЛБ по сравнению с МГШ. Следовательно, такое изменение количества оксида кальция в вяжущем, активируемого щелочью, может замедлить скорость реакции гидратации; образцы, изготовленные с высоким содержанием МЛБ, демонстрировали меньшую усадку при высыхании по сравнению с образцами с низким содержанием МЛБ [12]. Было отмечено, что более низкая усадка при высыхании среди первых партий образцов, активированных щелочью, наблюдалась в смеси МЛБ60. Это можно объяснить высокой скоростью химической реакции, которая привела к образованию более прочной структуры [12] связующего вещества, обладающего высокой устойчивостью

к усадке. Наличие песка (мелкозернистого заполнителя) также влияет на величину усадки образца, поскольку песок не подвержен усадке. Видно (см. табл. 3), что при добавлении комбинированного МЛБ и ТМКК в качестве заменителя МГШ в различных процентных соотношениях усадка при высыхании уменьшалась. Среди всех модифицированных образцов через 180 дней у образцов состава ККЛБ60 самая низкая усадка при высыхании – 175 микрон, что почти на 22,86 % меньше, чем у составов К и ККЛБ10, и на 57,14 % меньше, чем у МЛБ 60.

Выводы

1. При увеличении дозировки МЛБ текучесть шлакощелочных растворных смесей снижается. Это связано с различными химическими и физическими реакциями ингредиентов на ранних этапах гидратации минералов вяжущего.

2. Механическая прочность образцов бетона на композиционном бесцементном вяжущем уменьшается при увеличении содержания МЛБ, используемой вместо МГШ. Прочность на сжатие бетонных образцов увеличилась на 14,4 % (46,8 МПа) через 28 дней (композиционное вяжущее содержит 5 % МЛБ и 5 % ТМБКК) относительно контрольного состава.

3. Бесцементные вяжущие, содержащие в своем составе от 40 до 60 % МГШ и МЛБ от вяжущего, характеризуются снижением прочностных показателей на всем временном интервале наблюдения из-за изменения состава геля гидроалюмосиликата кальция относительно контрольного состава на основе молотого граншлака.

4. Исследование показало, что применение МЛБ в композиционном шлакощелочном вяжущем позволяет регулировать величину усадки при твердении на воздухе. Усадка образцов бетона ККЛБ60 (по 30 % МЛБ и ТМБКК) самая низкая по сравнению со всеми составами эксперимента, что положительно сказывается на долговечности бетона.

Список литературы

1. Abadel, A.A. Effect of molar ratios on strength, microstructure, and energy consumption in metakaolin geopolymer production / A.A. Abadel, A.S. Albida, A.H. Alteb, F.A. Alrshudi, H. Abbas, Y.A. Al-Sallum // *Adv. Concr. Constr.* – 2021. – 11. – 127–140.1.
2. Zhang, P. Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: a review / P. Zhang, Q. Gao, J. Wang, J. Guo, S. Hu, Y. Lin. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122389.16 // *J. Clean. Prod.* 2020. – 270. – 22389.
3. Li, W.-H. Study on the characteristics and microstructure of GGBS/FA-based geopolymer paste and concrete / W.-H. Li, J.-H. Wang, Y.-C. Ding, T.-W. Cheng. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291.17 // *Constr. Stroit. Mater.* – 2019. – 211. – 807–813.
4. Романенко, И.И. Получение бетонов на бесцементной основе с золой-уносом и ломом бетона / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Шереметьева, Д.М. Лобашина // *Инженерный вестник Дона.* – 2025. – № 2 (122). – С. 597–604.
5. Alharbi, Y.R. Effect of using available metakaolin and nanomaterials on the behavior of reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, O.A. Mayhoub, M. Kohail. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.21 // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – 269. – 121344.
6. Ali, B. Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high-strength recycled aggregate concrete / B. Ali, S. Raza, R. Kurda, R. Alyousef. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105444 // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2021. – 168. – 105444.
7. Liu, S. Use of red clay in cement production : A review / S. Liu, N. Zhang. – DOI: 10.1177/0734242X11407653.40 // *Waste Manag. Res.* – 2011. – 29. – 1053–1063.
8. Глуховский, В.Д. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения / В.Д. Глуховский, Р.Ф. Рунова, С.Е. Максунев. – Киев : Выща шк., 1991. – 242 с.
9. Романенко, И.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака / И.И. Романенко, А.И. Фадин // *Региональная архитектура и строительство.* – 2023. – №1(54). – С. 85–93.

10. Wang, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / B. Wang, L. Yan, Q. Fu, B. Kasal. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565 // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2021. – 171. – 105565.
11. Qian, D. Novel development of green ultra-high-performance concrete (UHPC) based on rational use of recycled binders / D. Qian, R. Yu, Q. Shui, Y. Sun, Q. Jiang, F. Zhou, M. Ding, S. Tong, Y. He. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121231 // *J. Clean. Prod.* 2020. – 261. – 121231.
12. Hussein, G. Effect of ceramic tile waste on the properties of alkali-activated self-compacting concrete / G. Hussein, A.R.M. Sam, Wei S. Kwok, J. Mirza. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117574.56 // *Constr. Stroit. Mater.* – 2020. – 236. – 117574.
13. Hyuk-Cheon, K. Effect of red clay content on the strength and efflorescence of slag-alkali cement pavement / K. Hyuk-Cheon, S.-P. Kang, G.-C. Choi. – DOI: 10.1186/s40069-018-0258-3.70 // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* – 2018. – 12. – 18.

References

1. Abadel, A.A. Effect of molar ratios on strength, microstructure, and energy consumption in metakaolin geopolymer production / A.A. Abadel, A.S. Albida, A.H. Alteb, F.A. Alrshudi, H. Abbas, Y.A. Al-Sallum // *Adv. Concr. Constr.* – 2021. – 11. – 127–140.1.
2. Zhang, P. Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: a review / P. Zhang, Q. Gao, J. Wang, J. Guo, S. Hu, Y. Lin. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122389.16 // *J. Clean. Prod.* 2020. – 270. – 22389.
3. Li, W.-H. Study on the characteristics and microstructure of GGBS/FA-based geopolymer paste and concrete / W.-H. Li, J.-H. Wang, Y.-C. Ding, T.-W. Cheng. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291.17 // *Constr. Stroit. Mater.* – 2019. – 211. – 807–813.
4. Romanenko, I.I. Production of cement-free concrete with fly ash and concrete scrap / I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina, M.I. Sheremetyeva, D.M. Lobashina // *Engineering Bulletin of the Don.* – 2025. – No. 2 (122). – P. 597–604.
5. Alharbi, Y.R. Effect of using available metakaolin and nanomaterials on the behavior of reactive powder concrete / Y.R. Alharbi, A.A. Abadel, O.A. Mayhoub, M. Kohail. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.21 // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – 269. – 121344.
6. Ali, B. Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high-strength recycled aggregate concrete / B. Ali, S. Raza, R. Kurda, R. Alyousef. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105444 // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2021. – 168. – 105444.
7. Liu, S. Use of red clay in cement production : A review / S. Liu, N. Zhang. – DOI: 10.1177/0734242X11407653.40 // *Waste Manag. Res.* – 2011. – 29. – 1053–1063.
8. Glukhovskiy, V.D. Binders and composite materials of contact hardening / V.D. Glukhovskiy, R.F. Runova, S.E. Maksunov. – Kyiv : Vyshcha shk., 1991. – 242 p.
9. Romanenko, I.I. Construction materials based on activated steelmaking slag / I.I. Romanenko, A.I. Fadin // *Regional architecture and engineering.* – 2023. – №1(54). – P. 85–93.
10. Wang, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete / B. Wang, L. Yan, Q. Fu, B. Kasal. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565 // *Resour. Conserv. Recycl.* – 2021. – 171. – 105565.
11. Qian, D. Novel development of green ultra-high-performance concrete (UHPC) based on rational use of recycled binders / D. Qian, R. Yu, Q. Shui, Y. Sun, Q. Jiang, F. Zhou, M. Ding, S. Tong, Y. He. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121231 // *J. Clean. Prod.* 2020. – 261. – 121231.
12. Hussein, G. Effect of ceramic tile waste on the properties of alkali-activated self-compacting concrete / G. Hussein, A.R.M. Sam, Wei S. Kwok, J. Mirza. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117574.56 // *Constr. Stroit. Mater.* – 2020. – 236. – 117574.
13. Hyuk-Cheon, K. Effect of red clay content on the strength and efflorescence of slag-alkali cement pavement / K. Hyuk-Cheon, S.-P. Kang, G.-C. Choi. – DOI: 10.1186/s40069-018-0258-3.70 // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* – 2018. – 12. – 18.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Кузина Валентина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Гвоздева Ольга Михайловна,
студентка
E-mail: olgagvozdevaaa@yandex.ru

Кошев Александр Николаевич,
доктор химических наук, профессор
кафедры «Информационно-
вычислительные системы», действительный
член Нью-Йоркской академии наук
E-mail: koshev@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Kuzina Valentina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information
and Computing Systems»
E-mail: kuzina@pguas.ru

Gvozdeva Olga Mikhailovna,
Student
E-mail: olgagvozdevaaa@yandex.ru

Koshev Aleksander Nikolaevich,
Doctor of Chemical Sciences, Professor
of the Department «Information
and Computing Systems», Full member
of the New York Academy of Sciences
E-mail: koshev@pguas.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00135,
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>.

ПАРАМЕТРЫ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНИСТОГО КАТОДА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РАВНОМЕРНОЕ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В.В. Кузина, О.М. Гвоздева, А.Н. Кошев

Рассмотрена задача получения равномерных гальванопокрытий композиционного материала металлом на основе математического моделирования электрохимического процесса металлизации проточных трехмерных электродов из углеродных волокнистых материалов. Представлен алгоритм вычисления оптимальных значений параметров удельной проводимости и удельной реакционной поверхности как постоянных величин. Приведен пример решения задачи и выбор углеродных волокнистых материалов с рассчитанными удельной электропроводностью и реакционной поверхностью, обеспечивающими наиболее равномерное гальваническое покрытие металлом по сравнению с равномерностью покрытия углеродных волокнистых материалов других марок при тех же технологических условиях.

Ключевые слова: углеродные композиционные материалы, проточные трехмерные электроды, гальваническое металлопокрытие, удельная электропроводность, реакционная поверхность, математическое моделирование

CALCULATION OF PARAMETERS OF CARBON FIBER CATHODE PROVIDING UNIFORM METAL COATING OF COMPOSITE MATERIAL

V.V. Kuzina, O.M. Gvozdeva, A.N. Koshev

This paper examines the problem of producing uniform galvanic coatings of a composite material using metal based on mathematical modeling of the electrochemical metallization process of flow-through three-dimensional electrodes made of carbon fiber materials. The relevance of this problem stems, in particular, from the need to obtain uniform galvanic coatings of the composite material with metal. An algorithm for calculating optimal values for specific conductivity and specific reactive

surface area as constants is presented. An example solution is provided, along with a selection of a CFM with calculated specific conductivity and reactive surface area that ensures the most uniform galvanic metal coating compared to other CFM grades under the same process conditions.

Keywords: carbon composite materials, flowing three-dimensional electrodes, galvanic metal coating, specific electrical conductivity, reaction surface, mathematical modeling

Введение. Особенности функционирования проточных трехмерных электродов (ПТЭ) из углеродных волокнистых материалов (УВМ) и разработанные методы математического моделирования электрохимических процессов в ПТЭ открывают возможности для совершенствования технологических процессов и разработки новых электролизеров при решении задач электроосаждения металлов в гидрометаллургии благородных, платиновых, редких и цветных металлов, рекуперации благородных, редких и цветных металлов из растворов различных производств при решении экологических проблем, а также для интенсификации электрохимических процессов при создании на основе УВМ электродных, композиционных, наноконпозиционных, каталитически активных и ионообменных материалов [1–12].

Разработка технологии процессов в ПТЭ при металлизации композиционных и наноконпозиционных материалов связана, в частности с решением задачи получения равномерных гальванопокрытий углеграфитовых волокон УВМ. Существующее многообразие углеродных материалов [1] и электрохимических методов получения модифицированных и активированных УВМ с заданными свойствами [1] обуславливает один из способов решения такой задачи за счет выбора УВМ с эффективной удельной проводимостью и удельной реакционной поверхностью.

В работах [13, 14] обсуждаются методы решения задачи получения равномерных металлопокрытий УВМ посредством расчета оптимальных значений распределенных по толщине ПТЭ ($0 \leq x \leq L$; L – толщина электрода) удельной электропроводности $\kappa_T(x)$ и реакционной поверхности $S_v(x)$. При этом предлагаемые методы и алгоритмы расчета $\kappa_T(x)$, $S_v(x)$ предполагают использование эффективных начальных значений перечисленных величин κ_T , S_v .

В данной статье представлен алгоритм расчета оптимальных значений параметров κ_T , S_v как постоянных величин. Приводится пример решения задачи и выбор УВМ с рассчитанными удельной электропроводностью и реакционной поверхностью, обеспечивающими наиболее равномерное гальваническое покрытие металлом по сравнению с равномерностью покрытия углеродных волокнистых материалов (УВМ) других марок при тех же технологических условиях.

Постановка задачи. Распределение искомым электрохимических функций потенциала $E(x)$, плотности поляризующего тока $J_s(x)$ и концентрации электроактивного вещества $C(x)$ описывается следующей системой дифференциальных уравнений [13, 14]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = - \frac{\kappa'_T(x) \kappa_G}{\kappa_T(x) (\kappa_T(x) + \kappa_G)} \frac{dE}{dx} + S_v(x) \left(\frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_G} \right) J_s(x); \quad (1)$$

$$J_s(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha ZFE(x)/RT) - \exp((\alpha - 1)ZFE(x)/RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha ZFE(x)/RT) / ZFK_m C(x)}; \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dx} = - \frac{S_v}{vZF} J_s(x); \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dx}(0) = - \frac{J_{cp}}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = - \frac{J_{cp}}{\kappa_G}; \quad C(0) = C_0. \quad (4)$$

Здесь j_0 – плотность тока обмена; α , Z , F , R , T – электрохимические и физические параметры.

Примем следующие обозначения комплексов физических и электрохимических параметров:

$$E_0 = \frac{2}{\alpha a} \ln \frac{\alpha a I}{2 \kappa_T^2 g S v j_0}; \quad E_1 = -\frac{I}{\kappa_T}; \quad K_1 = \frac{\kappa_T + \kappa_G}{\kappa_G \kappa_T} S v j_0; \quad K_2 = \frac{\alpha Z F}{RT};$$

$$K_3 = \frac{(1-\alpha) Z F}{RT}; \quad K_4 = j_0; \quad K_5 = Z F K_m; \quad K_6 = \frac{\kappa_T \kappa_G K_m}{(\kappa_G + \kappa_T) v}; \quad K_7 = \frac{S v j_0}{v Z F};$$

$$K_8 = j_0 - \frac{I \kappa_G K_m}{(\kappa_G + \kappa_T) v} + C_0 Z F K_m; \quad K_8 = K_4 - \bar{C} K_6; \quad K_9 = K_1 K_6 (K_2 + K_3).$$

Система дифференциальных уравнений (2), (3), моделирующая распределение процессов осаждения металла в проточных трехмерных электродах в рамках принятых обозначений и упрощений $d\kappa_T(x)/dx = 0$ примет вид:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \frac{\exp K_2 E - \exp(-K_3)}{1 + K_4 \exp K_2 E / K_5 C(x)}; \quad \frac{dC}{dx} = K_7 \frac{\exp K_2 E - \exp K_3 E}{1 + \exp K_2 E / K_5 C(x)}. \quad (5)$$

Преобразование системы (5) позволяет записать соотношение

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} = \frac{K dC}{dx}; \quad K = \frac{K_1}{K_7}. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) и подставляя результат в первое уравнение системы, получим

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} = K_1 \frac{K_6 (dE/dx - \bar{C}) (\exp K_2 E - \exp(-K_3 E))}{K_4 \exp K_2 E + K_6 (dE/dx - \bar{C})}. \quad (7)$$

Преобразование уравнения (7) с учетом линейного разложения присутствующих в уравнении экспонент позволяет записать приближенное решение системы (5) в алгебраической форме, из которой следует выражение для упрощенного расчета распределения потенциала ПТЭ в виде:

$$E \approx E_0 + E_1 x + \frac{K_9 E_0 (E_1 - \bar{C})}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x^2 +$$

$$+ \frac{K_9 (E_1 - \bar{C}) + 2E_2 (K_9 E_0 - K_2 K_4 E_1 - 2K_6 E_2)}{12E_2 (K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_1 K_6)} x^3. \quad (8)$$

Полученное уравнение удобно использовать для подбора УВМ при формировании ПТЭ из углеродистых материалов доступных марок с различными свойствами, в частности с различными значениями удельной электропроводности κ и удельной реакционной поверхности S_v . По формуле (8) рассчитываются значения $R = \max E(x) / \min E(x)$ для различных вариантов формирования проточного трехмерного электрода и выбирается вариант с наименьшим значением R . Для поиска минимума R , как функции от параметров κ_T и S_v : $R = R(\kappa_T, S_v)$ можно применять различные методы минимизации функции нескольких переменных, однако, так как выбор значений κ_T и S_v ограничен из-за конечного числа марок УВМ, определенных для использования при создании углеродного композита, представляется правильным при оптимизации использовать метод простого покоординатного спуска [15].

Результаты решения задачи. Ниже приводится расчет параметров κ_T и S_v , обеспечивающих наилучшую равномерность распределения металлического покрытия УВМ при электроосаждении меди из электролита состава: $\text{Cu} - 0,16$; $\text{H}_2\text{SO}_4 - 25$; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - 80$ (г/л) в проточном трехмерном электроде по методике, представленной в работе [14]. Марки УВМ и их основные свойства приведены в табл. 1 [1].

Т а б л и ц а 1

УВМ различных марок и их основные свойства

Марка материала	Удельная электрическая проводимость κ_T , См/см	Удельная реакционная поверхность S_v , см ² /см ³
КНМ	0,008	200
АНМ	0,015	210
НТМ-100	0,076	250
ВИНН-250	0,101	270
НТМ-200	0,2	270
ВНГ-50	0,46	265

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что для выбранных УВМ удельная проводимость меняется в пределах $0,008 \leq \kappa_T \leq 0,46$, а удельная реакционная поверхность – $200 \leq S_v \leq 270$. В этих пределах изменения переменных проведена минимизация функции $R(\kappa_T, S_v)$.

В результате решения задачи определено, что наилучшее распределение потенциала по толщине ПТЭ достигается при значениях $\kappa_T = 0,2$ и $S_v = 270$, что соответствует параметрам УВМ марки НТМ-200. В табл. 2 приведены результаты расчетов величины $R = \max E(x)/\min E(x)$ для различных марок УВМ.

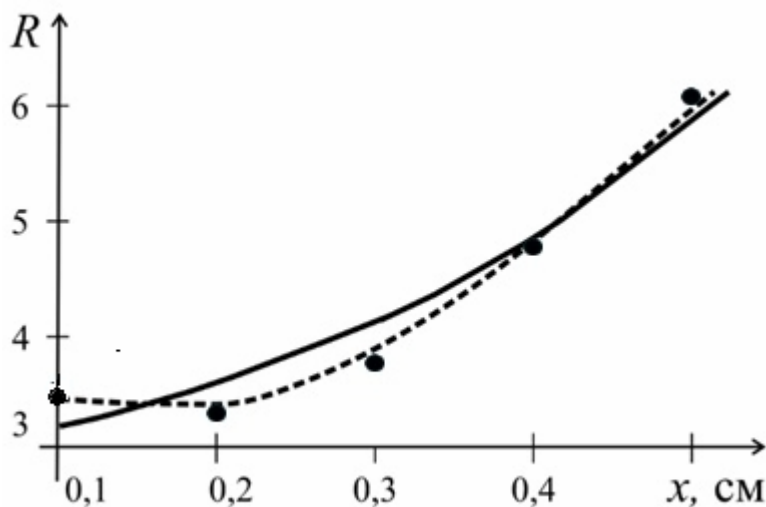
Т а б л и ц а 2

Значение показателя равномерности распределения потенциала по толщине ПТЭ

$R = \max E(x)/\min E(x)$ для различных марок УВМ

Марка УВМ	КНМ	АНМ	НТМ-100	ВИНН-250	НТМ-200	ВНГ-50
R	7,57	3,02	1,37	1,23	1,08	1,14

На рисунке приведены экспериментальная и расчетная кривые распределения металла по толщине ПТЭ. Данные рисунка показывают достаточное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.



Расчетное (сплошная линия) и экспериментальное (пунктир) распределение металла по толщине электрода из УВМ ВНГ-50 для скорости протока 0,4 см/с и габаритной плотности тока 1,5 А/см²

Заключение.

1. Представленные в работе полная и упрощенная математические модели описывают процессы электрохимической металлизации углеродных волокнистых материалов с достаточной степенью точности, что позволяет использовать моделирующие системы дифференциальных и алгебраических уравнений для расчетов процессов металлизации УВМ с целью прогнозирования распределения металлического покрытия по толщине трехмерного углеграфитового катода.

2. Приведенный метод выбора управляющих параметров κ_T и S_v процесса металлизации композиционных материалов из углеродных волокон для получения равномерных гальванопокрытий композиционного материала металлом может быть использован как для определения начальных значений при решении задачи поиска оптимально распределенных значений $\kappa_T(x)$ и $S_v(x)$, так и для определения параметров так называемого простого управления, когда удельная электропроводность и удельная реакционная поверхность ПТЭ представляют собой постоянные величины.

Список литературы

1. Электролизеры и электрохимические процессы с проточными трехмерными углеродными электродами. Основы разработки, математическое моделирование, теоретические и экспериментальные исследования, промышленное освоение: монография / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза : ПГУАС, 2025. – 360 с. – ISBN 978-5-9282-1769-3.
2. Averichev, O. Electrochemical method of deposition of an alumina coating on carbon fiber / O. Averichev, A. Ershov, S. Galyshev. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.275 // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, № 6. – P. 9563–9571.
3. Bottger-Hiller, F. Metal-Coated Carbon Fibres for Multifunctional CFRPs / F. Bottger-Hiller, M. Nier, T. Lampke. – DOI: 10.1365/s35724-014-0232-9 // *Journal of Object Technology – International Surface Technology*. – 2014. – No 7(1). – P. 44–45.
4. Butt, H.A. Multifunctional nanocomposite assessment using carbon nanotube fiber sensors / H.A. Butt, D.V. Krasnikov, V.A. Kondrashov, N.E. Gordeev, B.S. Voloskov, S.D. Konev, S.P. Shadrov, A.I. Vershinina, S.D. Shandakov, Z. Wang, R.T. Murzaev, Ju.A. Baimova, A.M. Korsunsky, I.V. Sergeichev, A.G. Nasibulin. – DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120368 // *Carbon*. – 2025. – Vol. 240. – P. 120368.
5. Grechushkina, D.E. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating / D.E. Grechushkina, V.A. Nelyub. – DOI:10.3103/s0967091223020079 // *Steel in Translation*. – 2023. – Vol. 53, № 2. – P. 134–137.
6. Loginov, A.V. Carbon nanofiber-based $\text{CuSn}(\text{OH})_6$ and CuSnO_3 composites for NO_2 gas sensors and supercapacitors / A.V. Loginov, A.I. Aparnev, O.N. Novgorodtseva, A.G. Bannov. – DOI: 10.15826/chimtech.9167 // *Chimica Techno Acta*. – 2025. – Vol. 12, No 4. – P. 9167.
7. Meng, Y. Carbon-Based Nanomaterials as Sustainable Noble-Metal-Free Electrocatalysts / Y. Meng, X. Huang, H. Lin, P. Zhang, Q. Gao, W. Li. – DOI: 10.3389/fchem.2019.00759 // *Front. Chem*. – 2019. – No 7. – P. 759.
8. Orbant, R.A. Effect of Yttrium on the Properties of Carbon Fiber-Reinforced ZrB₂-SiC Composites / R.A. Orbant, A.V. Utkin, D.A. Bannykh, M.A. Golosov, N.I. Baklanova // *Inorganic Materials*. – 2023. – Vol. 59, No. 11. – P. 1212–1219.
9. Vildanova, A.R. The effects of combining thermal, chemical and mechanical treatments on the electrical performance of wet-pulled carbon nanotube fibers / A.R. Vildanova, H.A. Butt, S.I. Serebrennikova, I.V. Novikov, S.P. Shadrov, V.A. Dmitrieva, V.A. Kondrashov, Yu.V. Ioni, Q. Deng, P. Ji, D.V. Krasnikov, A.E. Goldt, S.D. Shandakov, F.S. Fedorov, A.G. Nasibulin. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.12.157 // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2026. – Vol. 40. – P. 440–449.
10. Shirvanimoghaddam, K. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties / K. Shirvanimoghaddam, S.U. Hamim, M. Karbalaei

Akbari [et al.]. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.10.032 // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2017. – No 92. – P. 70–96.

11. Атанов, Б.И. Электрохимическое нанесение никелевого покрытия из сульфатного электролита на углеродное волокно / Б.И. Атанов, Е.Ю. Постнова, С.Н. Гальшев // В книге: Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения и защиты металлов и сплавов : тезисы докладов III Международной конференции памяти чл.-корр. РАН Ю.М. Полукарова. – Москва, 2024. – С. 48.

12. Сагитова, Ф.Р. Модификация углеродных волокон и тканей для их применения в качестве армирующих компонентов в композиционных материалах / Ф.Р. Сагитова, Ф.С. Шарифуллин. – DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81 // Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 8. – С. 81–86.

13. Кошев, А.Н. Распределенная реакционная поверхность углеродных объемно-пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и наноконпозиционных материалов. / А.Н. Кошев, В.В. Кузина. // Нанотехнологии в строительстве. – 2025. – № 17(2). – С. 119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.

14. Кошев, А.Н. Оптимизация процесса металлизации углеродных волокон при распределенной реакционной поверхности углеродного волокнистого электрода / А.Н. Кошев, В.В. Кузина, О.М. Гвоздева, В.К. Варенцов. – DOI: 10.54734/20722958_2025_4_32 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4 (65). – С. 32–37.

15. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 9-е изд. (эл.) – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2020. – 636 с. – ISBN 978-5-00101-836-0.

References

1. Electrolyzers and electrochemical processes with flow-through three-dimensional carbon electrodes. Development principles, mathematical modeling, theoretical and experimental studies, industrial development: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza : PSUAC, 2025. – 360 p. – ISBN 978-5-9282-1769-3.

2. Averichev, O. Electrochemical method of deposition of an alumina coating on carbon fiber / O. Averichev, A. Ershov, S. Galyshev. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.275 // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50, № 6. – P. 9563–9571.

3. Bottger-Hiller, F. Metal-Coated Carbon Fibres for Multifunctional CFRPs / F. Bottger-Hiller, M. Nier, T. Lampke. – DOI: 10.1365/s35724-014-0232-9 // Journal of Object Technology – International Surface Technology. – 2014. – No 7(1). – P. 44–45.

4. Butt, H.A. Multifunctional nanocomposite assessment using carbon nanotube fiber sensors / H.A. Butt, D.V. Krasnikov, V.A. Kondrashov, N.E. Gordeev, B.S. Voloskov, S.D. Konev, S.P. Shadrov, A.I. Verzhinina, S.D. Shandakov, Z. Wang, R.T. Murzaev, Ju.A. Baimova, A.M. Korsunsky, I.V. Sergeichev, A.G. Nasibulin. – DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120368 // Carbon. – 2025. – Vol. 240. – P. 120368.

5. Grechushkina, D.E. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating / D.E. Grechushkina, V.A. Nelyub. – DOI:10.3103/s0967091223020079 // Steel in Translation. – 2023. – Vol. 53, № 2. – P. 134–137.

6. Loginov, A.V. Carbon nanofiber-based $\text{CuSn}(\text{OH})_6$ and CuSnO_3 composites for NO_2 gas sensors and supercapacitors / A.V. Loginov, A.I. Aparnev, O.N. Novgorodtseva, A.G. Bannov. – DOI: 10.15826/chimtech.9167 // Chimica Techno Acta. – 2025. – Vol. 12, No 4. – P. 9167.

7. Meng, Y. Carbon-Based Nanomaterials as Sustainable Noble-Metal-Free Electrocatalysts / Y. Meng, X. Huang, H. Lin, P. Zhang, Q. Gao, W. Li. – DOI: 10.3389/fchem.2019.00759 // Front. Chem. – 2019. – No 7. – P. 759.

8. Orbant, R.A. Effect of Yttrium on the Properties of Carbon Fiber-Reinforced ZrB₂-SiC Composites / R.A. Orbant, A.V. Utkin, D.A. Bannykh, M.A. Golosov, N.I. Baklanova // *Inorganic Materials*. – 2023. – Vol. 59, No. 11. – P. 1212–1219.
9. Vildanova, A.R. The effects of combining thermal, chemical and mechanical treatments on the electrical performance of wet-pulled carbon nanotube fibers / A.R. Vildanova, H.A. Butt, S.I. Serebrennikova, I.V. Novikov, S.P. Shadrov, V.A. Dmitrieva, V.A. Kondrashov, Yu.V. Ioni, Q. Deng, P. Ji, D.V. Krasnikov, A.E. Goldt, S.D. Shandakov, F.S. Fedorov, A.G. Nasibulin. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.12.157 // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2026. – Vol. 40. – P. 440–449.
10. Shirvanimoghaddam, K. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties / K. Shirvanimoghaddam, S.U. Hamim, M. Karbalaei Akbari [et al.]. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.10.032 // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2017. – No 92. – P. 70–96.
11. Atanov, B.I. Electrochemical deposition of nickel coating from sulfate electrolyte on carbon fiber / B.I. Atanov, E.Yu. Postnova, S.N. Galyshev // In the book: *Fundamental and applied issues of electrochemical and chemical-catalytic deposition and protection of metals and alloys : Abstracts of the III International Conference in memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Yu.M. Polukarov*. – Moscow, 2024. – P. 48.
12. Sagitova, F.R. Modification of carbon fibers and fabrics for their use as reinforcing components in composite materials / F.R. Sagitova, F.S. Sharifullin. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81 // *Bulletin of the Technological University*. – 2025. – Vol. 28, No. 8. – P. 81–86.
13. Koshev, A.N. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials. / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // *Nanotechnologies in Construction*. – 2025. – No 17(2). – P. 119–131. – URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131>. – EDN: XWDYCA.
14. Koshev, A.N. Optimization of the metallization process of carbon fibers with a distributed reaction surface of a carbon-graphite fiber electrode. / A.N. Koshev, V.V. Kuzina, O.M. Gvozdeva, V.K. Varentsov. – DOI: 10.54734/20722958_2025_4_32 // *Regional architecture and engineering*. – 2025. – No. 4 (65). – P. 32–37.
15. Bakhvalov, N.S. Numerical methods. / N.S. Bakhvalov, N.P. Zhidkov, G.M. Kobelkov. – 9th ed. (el.) – Moscow : Basic Knowledge Laboratory, 2020. – 636 p. – ISBN 978-5-00101-836-0.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Москвин Роман Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Эксплуатация автомобильного
транспорта»
E-mail: moskva_in@mail.ru

Белякова Елена Александровна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Кадастр недвижимости и право»
E-mail: var_lena@mail.ru

Родин Вячеслав Сергеевич,
магистрант
E-mail: slavock2018@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Moskvin Roman Nikolaevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Operation of Automobile
Transport»
E-mail: moskva_in@mail.ru

Belyakova Elena Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Real estate cadastre and right»
E-mail: var_lena@mail.ru

Rodin Vyacheslav Sergeevich,
Master's student
Email: slavock2018@yandex.ru

МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова, В.С. Родин

Получены зависимости морозостойкости минерально-шлаковых вяжущих от водовяжущего отношения и сырьевого состава. Установлено, что водовяжущее отношение является одним из наиболее важных факторов, определяющих параметры структуры и порового пространства затвердевшего композита.

Доказано, что условия и продолжительность твердения образцов, способ их формирования влияют на морозостойкость, изменяя степень гидратации вяжущего и структурное пространство бетона. Выявлено, что вибропрессование дает хорошую упаковку частиц материала и способствует повышению морозостойкости материала.

Испытания морозостойкости минерально-шлаковых вяжущих проводились на образцах, выполненных из глино- и карбонатно-шлаковых вяжущих, а также доломито-, гравелито-, глауконито- и силицитошлаковых вяжущих. Достигнутая марка по морозостойкости для бетона на этих вяжущих соответствует требованиям, предъявляемым не только к конструкционно-теплоизоляционным, но и к конструкционным материалам.

Ключевые слова: морозостойкость, бетоны, минерально-шлаковые вяжущие, сырьевой состав, структура, испытания

FROST RESISTANCE OF CONCRETE BASED ON MINERAL-SLAG BINDERS

R.N. Moskvin, E.A. Belyakova, V.S. Rodin

The relationships between the water-to-binder ratio, the raw material composition of mineral-slag binders, and their frost resistance have been studied. It is established that the water-to-binder ratio is one of the most important factors determining the parameters of the structure and pore space.

It is found that the conditions and duration of specimen curing, as well as the molding method, influence frost resistance altering the degree of binder hydration and the structural space. Vibratory compaction is found to ensure good particle packing and leads to increased frost resistance.

Frost resistance tests of mineral-slag binders were conducted on specimens made from clay and carbonate-slag binders, as well as dolomite, gravel, glauconite, and silicite-slag binders. The achieved frost resistance grade for concrete using these binders meets the requirements not only of structural and heat-insulating materials, but also of construction materials.

Keywords: frost resistance, concrete, mineral slag binders, raw material composition, structure, testing

К основным факторам, определяющим морозостойкость изделий, относят: начальное водовязущее (В/В) отношение; состав и условия твердения материала, его возраст к моменту замораживания; структурную плотность, наличие, вид и количество поверхностно-активных пластифицирующих и воздухововлекающих добавок.

Способность материала противостоять разрушению при многократном замораживании и оттаивании в насыщенном водой состоянии объясняется присутствием в его структуре не заполненных водой резервных пор, в которые отжимается часть воды при замораживании. Под действием давления растущих кристаллов льда происходит нарушение структуры материалов [1-3].

Водовязущее отношение оказывает значительное влияние на морозостойкость минерально-шлаковых материалов, так как является одним из наиболее важных факторов, определяющих параметры их структуры и порового пространства. С увеличением В/В-отношения возрастает как общий объем открытых пор, доступных водонасыщению, так и средний размер пор, что снижает морозостойкость материала. При высоких значениях В/В-отношения, равных 0,4-0,5, средний размер капилляров в шлаковых бетонах превышает средний размер пор в цементных материалах при том же В/В, т.к. степень гидратации и количество связанной воды у шлаков ниже, чем у цементных материалов в нормативные сроки твердения. Поэтому поры не могут быть к 28-суточному возрасту целиком заполнены продуктами гидратации шлака и остаются связанными друг с другом, образуя непрерывную систему капилляров. Шлаковые бетоны с таким строением порового пространства характеризуются высокой проницаемостью, и в них сложнее образовать некоторый объем резервных пор. Эти материалы обладают повышенным водопоглощением, и большая часть воды в них при замораживании переходит в лед, при этом образец разрушается.

В процессе твердения вяжущего на начальном этапе формирования структуры материала вода затвердения образует в материале систему взаимосвязанных капиллярных пор, беспорядочно расположенных по всему объему материала. С течением времени в условиях продолжающейся гидратации шлака капиллярная пористость камня уменьшается, так как объем, занимаемый продуктами гидратации шлака, вместе с порами между кристаллическими новообразованиями (порами геля) примерно в два раза больше абсолютного объема негидратированного шлака. При достижении высокой степени гидратации шлака, что наблюдается обычно через 180÷360 суток твердения, система взаимосвязанных капиллярных пор становится условно дискретной, то есть поры в материале, ранее представленные в виде сообщающихся друг с другом капилляров, оказываются разобщенными шлаковым гелем, также имеющим поры, но существенно меньших размеров. С образованием подобной структуры камня проницаемость материала резко уменьшается. Подобное строение порового пространства в минеральношлаковом камне не возникает, если доля шлака мала, а доля минерального наполнителя высока, даже при низких начальных водовязущих отношениях.

Условия и продолжительность твердения образцов, способ формирования влияют на морозостойкость, изменяя степень гидратации вяжущего и структурное пространство бетона. При благоприятных длительных условиях твердения и оптимальной структуре, исключающих испарение воды из материала, особенно на начальном этапе формирования его структуры, достигается высокая степень гидратации шлака, и в материале образуется система резервных пор.

Вибропрессование дает хорошую упаковку частиц материала, т.е. практически исключает макро- и микродефекты, в которых может накапливаться вода. При вибропрессовании минеральношлаковых композиций берется оптимальное В/В-отношение, которое изменяет структуру порового пространства. По сравнению с вибрационным формированием общий объем открытых пор, доступных водонасыщению, снижается. Это приводит к повышению морозостойкости материала.

Под действием гидростатического давления водный раствор может перемещаться в резервные поры, что исключает возможность возникновения и роста растягивающих напряжений в кристаллическом сростке шлакового камня. Разрушение бетона в

насыщенном водой состоянии при многократном замораживании и оттаивании наступает только тогда, когда все резервные поры будут заполнены водой или образовавшимся при ее замерзании льдом. Чем больше относительный объем резервных пор в единице объема материала, тем больше циклов попеременного замораживания и оттаивания необходимо, чтобы вызвать разрушение образца, т.е. морозостойкость тем выше, чем больше его условно-замкнутая пористость, представленная резервными порами [1-3].

Испытания на морозостойкость минеральношлаковых образцов проводились в соответствии с ГОСТ 10060-2012 по ускоренной методике 3 в два этапа, различающихся между собой временем создания минерально-шлаковых вяжущих в зависимости от вида горной породы. На первом этапе были разработаны глино- и карбонатно-шлаковые вяжущие, на втором временном этапе – доломито-, гравелито-, глауконито- и силицитошлаковые вяжущие. Далее были осуществлены испытания на морозостойкость композиционных материалов на основе приведенных типов вяжущих. Для испытания в обоих случаях были изготовлены образцы размером 70×70×70 мм на основе сухомолотого липецкого шлака ($S_{уд}=320\div350$ м²/кг), известняка молотого Иссинского карьера Пензенской области ($S_{уд}=400$ м²/кг), глины Долгоруковского месторождения Пензенской области ($S_{уд}=400$ м²/кг), молотого доломитизированного известняка ($S_{уд}=350-400$ м²/кг), молотого отсева ПГС Жигулевского карьера ($S_{уд}=630$ м²/кг), молотого глауконитового песчаника ($S_{уд}=500$ м²/кг). Композиционное вяжущее активизировалось едким натром техническим. В качестве мелкозернистого заполнителя использовали сурский песок с $M_{кр}=1,57$, в качестве крупного – отсев карбонатных пород Иссинского карьера фракции 5-10 мм, отсев ПГС Жигулевского карьера фракции 5-10 мм, дробленый доломит Воронежской области фракции 5-10 мм, керамзит. Для сравнения были изготовлены также составы с использованием в качестве вяжущего вольского цемента ЦЕМ I 32,5.

Соотношение компонентов вяжущего и заполнителей, а также результаты исследований карбонатно-шлаковых композиций и материалов на их основе приведены в табл. 1. Результаты испытания морозостойкости показали: низкощелочные карбонатно-шлаковые вяжущие невысокой марки (М-125) имеют морозостойкость не ниже 100 циклов попеременного замораживания-оттаивания; добавка порошкообразной глины в количестве 4÷5 % существенно повышает марку по морозостойкости, а прочность на промежуточных стадиях испытаний не имеет тенденции к уменьшению, что диктует целесообразность введения добавок глины в сырьевые смеси для повышения марки изделий по морозостойкости; увеличение содержания шлака до 60 % приводит к повышению морозостойкости до марки более F-200; наполнение карбонатно-шлакового вяжущего мелким заполнителем фракции 0÷5 мм снижает морозостойкость прессовок, однако карбонатный песок имеет преимущество по сравнению с кварцевым. Вероятно, это можно объяснить большей адгезией карбонатно-шлакового вяжущего к поверхности кальцита, что подтверждается результатами испытания прочности сцепления вяжущего с поверхностью кальцита и кварца. Тем не менее достигнутая марка по морозостойкости F50÷F75 для карбонатно-шлаковых изделий соответствует требованиям ГОСТ 530-2012 по этому показателю к стеновым материалам; сравнение показателей морозостойкости образцов на цементном и карбонатно-шлаковом вяжущем при равных долях заполнителя свидетельствует о близких их значениях.

На втором этапе первоначально была произведена оценка коэффициентов водостойкости разработанных позднее минеральношлаковых вяжущих (доломитошлаковых, гравелитошлаковых, глауконитошлаковых и силицитошлаковых) и строительных материалов на их основе (табл. 1). Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что коэффициент водостойкости в зависимости от рецептурных и технологических факторов изменяется в пределах от 0,65 до 1,03. Принимая во внимание тот факт, что водостойкими материалами считаются такие, у которых $k_b \geq 0,75$, можно предположить их использование по различным функциональным

назначениям, в том числе при неблагоприятных воздействиях окружающей среды (попеременное насыщение-высушивание, замораживание-оттаивание и др.).

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты водостойкости разработанных вяжущих

Минерально-шлаковое вяжущее	Вид формования	Содержание шлака в композиции	Водо-содержание, %	Коэффициент водостойкости
Глауконитошлаковое	Вибро-прессование	20	14	0,65-0,70
		60		0,90-0,95
Гравелитошлаковое	Вибро-уплотнение	60	25	0,70-0,75
		20		14
Гравелитошлаковое	Вибро-прессование	60	25	
		60		0,82-0,87
Халцедоново-шлаковое	Вибро-прессование	20	14	0,84-0,89
		60		0,88-0,93
	Вибро-уплотнение	60	25	—

Результаты испытания бетонов на основе минерально-шлаковых вяжущих приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Характеристика составов и марка образцов по морозостойкости

№ п/п	Состав композиций соотношение компонентов в массовых % в % от массы сухого композ. вяжущего							Водошлаковое отношение	Прочность при сжатии контрольных образцов $R_{сжк}$, МПа	Прочность при сжатии после 75 циклов $R_{сжк}$, МПа	Прочность при сжатии после 100 циклов $R_{сжк}$, МПа	Прочность при сжатии после 150 циклов $R_{сжк}$, МПа	Прочность при сжатии после 200 циклов $R_{сжк}$, МПа	Марка по морозостойкости материала	
	шлак	цемент	известняк	глина	кварцевый песок	карбонатный песок	щелочь								вода
1	$\frac{17,5}{20,0}$	—	$\frac{69,8}{80,0}$	—	—	—	$\frac{2,2}{2,5}$	$\frac{10,5}{12,0}$	0,6	13,3	13,0	12,7	9,6	—	F100
2	$\frac{17,5}{20,0}$	—	$\frac{65,5}{75,0}$	4,3 5,0	—	—	$\frac{2,2}{2,5}$	$\frac{10,5}{12,0}$	0,6	13,4	15,3	16,5	14,6	12,4	F150
3	$\frac{52,4}{60,0}$	—	$\frac{34,9}{40,0}$	—	—	—	$\frac{2,2}{2,5}$	$\frac{10,5}{12,0}$	0,2	31,1	32,0	32,5	32,4	31,6	более F200
4	$\frac{14,8}{50,0}$	—	$\frac{14,8}{50,0}$	—	$\frac{59,1}{200,0}$	—	$\frac{0,7}{2,5}$	$\frac{10,6}{12,0}$	0,24	14,8	13,8 потеря по массе >5 %	9,2	—	—	F50
5	$\frac{14,8}{50,0}$	—	$\frac{14,8}{50,0}$	—	—	$\frac{59,1}{200}$	$\frac{0,7}{2,5}$	$\frac{10,6}{12,0}$	0,24	14,8	14,1	12,7	—	—	F75
6	—	$\frac{22,32}{50,0}$	$\frac{22,33}{50,0}$	—	—	$\frac{44,65}{100}$	—	$\frac{10,7}{12,0}$	0,24	24,2	23,8	23,2 потеря по мас-се 5 %	21,6	—	F100

В ы в о д ы :

- низкощелочные минеральношлаковые вяжущие невысокой марки (М-100) имеют морозостойкость не ниже 50 циклов попеременного замораживания-оттаивания и сравнимы с бетоном на цементе;
- при одинаковых составах бетона сравнение показателей морозостойкости образцов на цементном, глино- и карбонатно-шлаковом вяжущих свидетельствует о близких их значениях;
- бетоны на гравелитошлаковом и глауконитошлаковом вяжущих в процессе испытания на морозостойкость практически не изменили прочностных показателей до конца испытания.

Таким образом, достигнутая марка по морозостойкости F200 для бетона на этих вяжущих соответствует требованиям, предъявляемым не только к конструкционно-теплоизоляционным, но и к конструкционным материалам, подвергающимся комплексному воздействию нагрузки и различных факторов окружающей среды.

Список литературы

1. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. – Киев : Издательство «Будівельник», 1978. – 184 с.
2. Калашников, В.И. Новые геополимерные материалы из горных пород, активированные малыми добавками шлака и щелочей / В.И. Калашников, В.Л. Хвастунов, Н.И. Макридин, А.А. Карташов // Строительные материалы. – 2006. – № 6. – С. 93–95.
3. Хабибуллина, Н.Р. Повышение эффективности шлакощелочных вяжущих и бетонов / Н.Р. Хабибуллина, Р.З. Рахимов // Бетон и железобетон. – 2006. – №5. – С. 15–17.
4. Рахимова, Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие и бетоны на их основе для транспортного строительства / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов, М.М. Рахимов // Транспортное строительство. – 2008. – №1. – С. 24–28.
5. Москвин, Р.Н. Кинетические особенности нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций, активизированных щелочными компонентами / Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 1 (62). – С. 83–89.
6. Тараканов, О.В. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона / О.В. Тараканов, Т.К. Акчуринов, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – № 3 (88). – С. 97–107.

References

1. Glukhovsky, V.D. Slag-alkali cements and concretes / V.D. Glukhovsky, V.A. Pakhomov. – Kyiv : Budivelnik Publishing House, 1978. – 184 p.
2. Kalashnikov, V.I. New geopolymer materials from rocks activated by small additions of slag and alkalis / V.I. Kalashnikov, V.L. Khvastunov, N.I. Makridin, A.A. Kartashov // Construction materials. – 2006. – No. 6. – P. 93–95.
3. Khabibullina, N.R. Improving the efficiency of slag-alkali binders and concretes / N.R. Khabibullina, R.Z. Rakhimov // Concrete and Reinforced Concrete. – 2006. – No. 5. – P. 15–17.
4. Rakhimova, N.R. Composite slag-alkali binders and concretes based on them for transport construction / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov, M.M. Rakhimov // Transport construction. – 2008. – No. 1. – P. 24–28.
5. Moskvina, R.N. Kinetic features of strength increase of carbonate-slag composites activated by alkaline components / R.N. Moskvina, E.A. Belyakova // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 1 (62). – P. 83–89.
6. Tarakanov, O.V. Expanding the base of complex organomineral additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. – 2022. – No. 3 (88). – P. 97–107.

УДК 69.003:502.131

DOI 10.54734/20722958_2026_2_77

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Симонова Ирина Николаевна,
кандидат исторических наук, доцент
кафедры «Инженерная экология»
E-mail: irina.simonova.79@mail.ru

Бойко Андрей Владимирович,
магистрант направления подготовки
20.04.01 «Техносферная безопасность»

Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Simonova Irina Nikolaevna,
Candidate of Historical Sciences, Associate
Professor of the Department «Engineering
Ecology»
E-mail: irina.simonova.79@mail.ru

Boyko Andrey Vladimirovich,
Master's degree in the 20.04.01
«Technosphere Safety» program

НИЗКОУГЛЕРОДНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ОСНОВА ПЕРЕХОДА К «ЗЕЛЕНОМУ» СТРОИТЕЛЬСТВУ В РОССИИ

И.Н. Симонова, А.В. Бойко

Дан комплексный анализ состояния и перспектив развития «зеленого» строительства в России как ответа на глобальные вызовы изменения климата, истощения ресурсов и урбанизации. Особое внимание уделено поэтапному снижению углеродного следа за счет использования низкоуглеродных строительных материалов. Выявлены основные препятствия для внедрения «зеленых» практик в России, включая высокие начальные затраты, дефицит квалифицированных кадров, слабую нормативную базу и климатическую специфику. Показано, что внедрение низкоуглеродных строительных материалов и принципов «зеленого» строительства способно обеспечить баланс экологической, социальной и экономической эффективности, а также стать драйвером инновационного развития строительной отрасли России.

Ключевые слова: низкоуглеродные строительные материалы, «зеленое» строительство, жизненный цикл здания, энергоэффективность, устойчивое развитие

LOW-CARBON BUILDING MATERIALS ARE THE BASIS OF THE TRANSITION TO "GREEN" CONSTRUCTION IN RUSSIA

I.N. Simonova, A.V. Boyko

A comprehensive analysis of the current state and development prospects of green construction in Russia is given as a response to the global challenges of climate change, resource depletion, and urbanization. Special attention is paid to a gradual reduction of the carbon footprint through the use of low-carbon building materials. The main obstacles to the implementation of green practices in Russia are identified, including high initial costs, a shortage of qualified personnel, a weak regulatory framework, and climatic specifics. It is shown that the introduction of low-carbon building materials and the principles of green construction can ensure a balance of environmental, social, and economic efficiency, as well as to become a driver for innovative development in Russian construction industry.

Keywords: low-carbon building materials, green construction, building life cycle, energy efficiency, sustainable development

Изменение климата, истощение ресурсов и урбанизация обусловили переход строительной отрасли к парадигме устойчивого развития. Экологическое строительство или «зеленое» строительство – это целостная концепция проектирования, строительства и эксплуатации зданий, направленная на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека на всех этапах жизненного цикла объекта.

В России, несмотря на значительный потенциал, «зеленое» строительство находится в стадии формирования. Был проведен комплексный анализ текущего состояния и перспектив развития этого направления в нашей стране.

Ключевыми принципами и целями «зеленого» строительства являются: энергоэффективность, водосбережение, экологичные материалы, качество среды внутри помещений, умное управление отходами, благоустройство территории. Особое значение в данной сфере строительства приобретают низкоуглеродные строительные материалы, которые в дальнейшем могут заменить традиционные материалы.

Низкоуглеродные строительные материалы — это материалы, чей углеродный след, то есть объем выбросов парниковых газов, значительно снижен на протяжении всего жизненного цикла: от добычи сырья и производства до транспортировки, эксплуатации и утилизации.

Ключевое отличие от традиционных материалов в том, что их производство требует меньше энергии, они часто состоят из переработанных компонентов или сами способны накапливать углерод. Для понимания сути важно знать, что именно они призваны сокращать «воплощенный углерод» здания. Примерно 20 % всех выбросов строительной отрасли скрыты в материалах стен, фундамента и отделки.

На практике существуют три основных пути получения таких материалов, и по этому принципу их удобно классифицировать (рис. 1).



Рис. 1. Классификация низкоуглеродных строительных материалов

Рассмотрим более подробно эти группы низкоуглеродных строительных материалов, роль которых в «зеленом» строительстве с каждым годом растет. Первая группа – материалы на основе переработанных отходов. Первичное сырье заменяется промышленными побочными продуктами, что резко снижает энергозатраты на производство:

- низкоуглеродный бетон и вяжущие заменяют золой-уносом (отход ТЭЦ), доменным шлаком или геополимерами на 100 % из золошлаков. Например, в Новосибирске разработали материал на основе золошлаков, не уступающий по прочности цементу [4];

- «зеленая» плитка и кирпич производятся из переработанного стекла (свыше 55 % состава) или керамических отходов, что решает проблему свалок и снижает выбросы;

- переработанные металлы переплавляются из алюминия, что требует на 95 % меньше энергии, чем первичное производство. Старые строительные конструкции или даже контейнеры для перевозок могут использоваться повторно.

Вторая группа строительных материалов – биогенные материалы или поглотители углерода. Эти материалы не просто меньше выделяют CO₂, а хранят его, будучи сделанными из возобновляемого сырья:

- древесина и бамбук, который очень быстро растет, а его ламинированные версии прочнее мягкой стали;

– инновационная биоорганика – это мицелий грибов, который выращивается в формы, заменяет пенопласт; волокна люффы, костробетон – смесь конопляных волокон с известью, утеплители из целлюлозы.

Третья группа низкоуглеродных строительных материалов – технологически оптимизированные материалы:

– низкоуглеродный цемент, который содержит больше известняка и требует меньшего обжига, снижая выбросы на 10-15 %;

– фибробетон без опалубки и с минимальным перерасходом материала созданный за счет 3D-печати;

– «умные» полимеры – утеплители, произведенные с компенсацией углеродного следа через «углеродные единицы» на основе биополимерных композитов с аэрогелем.

Низкоуглеродные строительные материалы экологичны (сокращают свалки, экономят ресурсы, связывают CO₂); экономичны (менее энергозатратное производство и логистика); технологичны (биокompозиты, геополимеры и мицелий зачастую превосходят традиционные аналоги по прочности и легкости).

Основной целью «зеленого» строительства является достижение баланса между экологической, социальной и экономической эффективностью (рис. 2).



Рис. 2. Триединая концепция «зеленого» строительства

Нельзя не учитывать проблемы и вызовы, которые возникают при реализации «зеленого» строительства в России:

1. Высокая начальная стоимость из-за дорогих материалов и современных технологий.

2. Нехватка квалифицированных специалистов в этой специфической области и опыта.

3. Слабая нормативная база, так как большинство стандартов носят добровольный характер.

4. Скептицизм застройщиков – не все верят в быструю окупаемость дополнительных инвестиций.

5. Особенности климата – акцент на энергосбережении часто перевешивает другие аспекты, например, водосбережение [3].

Для ускорения перехода к «зеленому» строительству в России необходимы:

– нормативно-правовые меры – внедрение обязательных требований к энергоэффективности и экологичности для объектов с госучастием;

– экономические стимулы, такие, как «зеленые» налоговые вычеты, льготные кредиты и ставки по ипотеке для сертифицированного жилья;

– информационно-образовательные ресурсы – развитие образовательных программ, популяризация преимуществ «зеленого» строительства среди населения;
 – научно-технические ресурсы – стимулирование применения новых экологических материалов и технологий циркулярной экономики в строительстве [1].

Одной из ключевых задач применения «зеленого» строительства в России является снижение выбросов парниковых газов.

На рис. 3 дана схема снижения парниковых газов в «зеленом» строительстве, охватывающая все этапы: этап проектирования или фундамент для снижения парниковых газов; этап строительства или минимизация «воплощенного углерода»; этап эксплуатации здания – снижение «операционного углерода»; конец жизненного цикла или демонтаж и утилизация [2].



Рис. 3. Этапы снижения парниковых газов в «зеленом» строительстве

Этап проектирования или фундамент для снижения парниковых газов представлен на рис. 4.

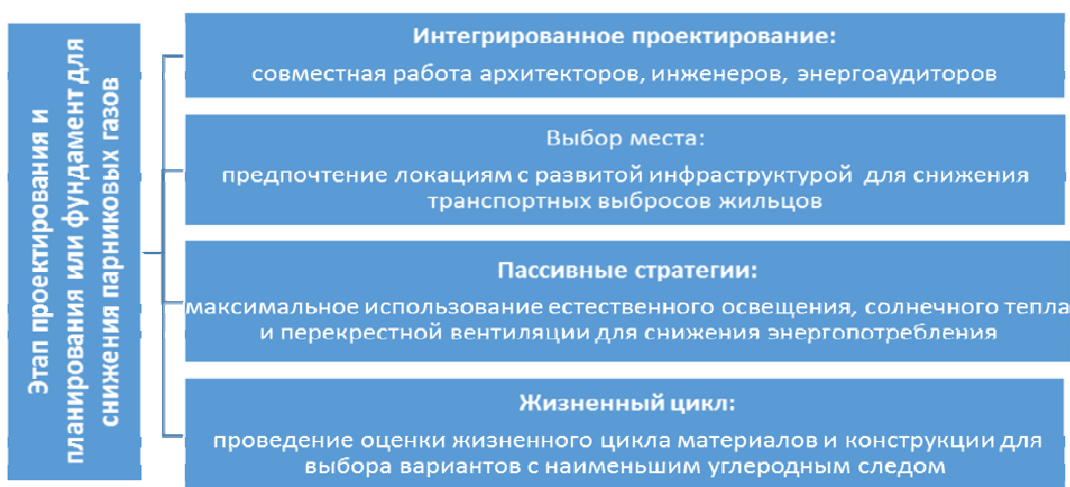


Рис. 4. Этап проектирования и планирования или фундамент для снижения парниковых газов

Этот этап является системообразующим фундаментом для снижения углеродного следа здания. Его эффективность достигается не за счет отдельных мер, а благодаря комплексному подходу, который закладывает принципы экологичности в саму ДНК объекта.

Второй этап строительства и минимизации «воплощённого углерода» достигается не за счёт одной технологии, а за счёт комплексного подхода, объединяющего ответственный выбор материалов, оптимизацию процессов строительства и принципы циркулярной экономики. Это превращает стройплощадку из места генерации выбросов в площадку для реализации климатических целей проекта, что видно из рис. 5.



Рис. 5. Этап строительства и минимизации «воплощённого углерода»

Совокупность мер данного этапа закладывает материальную основу для всего объекта, существенно уменьшая его «воплощённый углерод», то есть совокупные выбросы, связанные с материалом, строительством и утилизацией. Это превращает этап строительства из источника значительных эмиссий в область применения инновационных экологических решений, что является неотъемлемой частью современного устойчивого строительства и ответственного подхода к ресурсам планеты [5].

Следующий важный этап эксплуатации здания – этап снижения «операционного углерода» (рис. 6). Это длительный процесс активного управления энергопотоками, направленный на постоянное снижение потребления за счет технологий, «зеленой» энергии и грамотной эксплуатации. Его можно назвать этапом управления и минимизации операционных выбросов. Он предусматривает использование энергоэффективного оборудования и «умных» систем управления зданием, применение возобновляемых источников энергии, озеленение территорий и кровли [2].

Эксплуатационный этап является критически важным для снижения углеродного следа здания, поскольку на него приходится до 80 % совокупного воздействия на климат на протяжении всего жизненного цикла постройки. Десятилетия эксплуатации определяют реальную экологическую эффективность объекта.

Финальный этап снижения парниковых газов в «зеленом» строительстве – это конец жизненного цикла, или демонтаж и утилизация (рис. 7).

Переход от традиционного сноса к системному демонтажу и глубокой переработке отходов замыкает жизненный цикл объекта, трансформируя его окончание из этапа образования отходов в источник ресурсов для новых циклов. Это создает экономическую и экологическую ценность: сохраняется стоимость материалов, снижается потребность в первичном сырье и минимизируется воздействие на окружающую среду. Таким образом, современная утилизация за счет низкоуглеродных строи-

тельных материалов становится стартом для нового цикла, реализуя принципы циркулярной экономики в строительстве [6, 7].

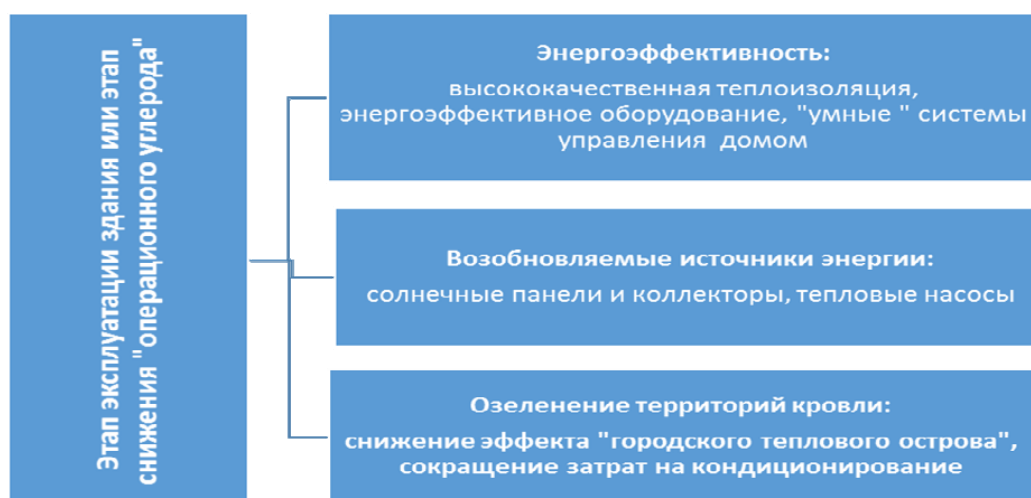


Рис. 6. Этап эксплуатации здания или этап снижения «операционного углерода»



Рис. 7. Конец жизненного цикла, или демонтаж и утилизация

Выводы

1. Низкоуглеродные строительные материалы – фундамент новой строительной культуры, главный инструмент достижения целей «зеленого» строительства. Как показало исследование, они обеспечивают экологичность за счет сокращения углеродного следа и свалок, экономическую выгоду за счет снижения энергозатрат и открывают новые технологические горизонты благодаря инновационным свойствам, таким, как прочность, легкость, долговечность.

2. В российской практике данное направление находится на стадии активного формирования. Успешные примеры разработки и применения низкоуглеродных строительных материалов на основе вторсырья доказывают, что «зеленое» строительство представляет собой не просто набор технологий, а целостную парадигму, направленную на достижение баланса экологической, социальной и экономической эффективности на всех этапах жизненного цикла здания.

3. Несмотря на значительный природный и технологический потенциал, развитие экологического строительства в стране находится на начальной стадии и сталкивается с комплексом системных барьеров. Ключевыми из них являются высокая первоначальная стоимость, дефицит квалифицированных кадров, недостаточно развитая нормативно-правовая база, а также скептическое отношение части рынка к долгосрочной окупаемости инвестиций. Климатические особенности России закономерно смещают фокус в сторону энергоэффективности, однако для истинной устойчивости необходимо комплексное внедрение всех принципов: водосбережения, использования

низкоуглеродных строительных материалов, обеспечения качества внутренней среды и циркулярного управления отходами.

4. Успешная интеграция низкоуглеродных строительных материалов в «зеленое» строительство в России способна не только снизить нагрузку на окружающую среду и улучшить качество жизни населения, но и стать драйвером инновационного развития отрасли, повышения энергетической безопасности и конкурентоспособности национальной экономики в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Шевчук, А.В. «Зеленое» строительство в России: предпосылки, барьеры, стимулы развития / А.В. Шевчук, С.Н. Бобылев // Экономика региона. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 1121–1135.
2. Капитонов, С.В. Анализ нормативно-правового обеспечения «зеленого» строительства в Российской Федерации / С.В. Капитонов, Р.А. Курбанов // Жилищное строительство. – 2021. – № 11. – С. 45–51.
3. Симонова, И.Н. Стратегии низкоуглеродного развития России / И.Н. Симонова, Е.В. Ляшонкова, Р.К. Орленко // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства : сборник докладов VII Национальной научно-практической конференции. – Пенза, 2024. – С. 63–66.
4. Симонова, И.Н. Перспективы развития «зеленого» строительства в России / И.Н. Симонова, Е.В. Ляшонкова, Д.Д. Симонова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2023. – № 2 (45). – С. 119–124.
5. Киберт, Ч. Устойчивое строительство: проектирование и доставка / Ч. Киберт. – Нью-Йорк : John Wiley & Sons, 2016. – 560 с.
6. Эйкер, У. Энергоэффективные здания с солнечными и геотермальными ресурсами / У. Эйкер. – Чичестер : Wiley, 2014. – 345 с.
7. Хоси, Л. Форма зелёного: эстетика, экология и дизайн / Л. Хоси. – Вашингтон : Island Press, 2012. – 216 с.

References

1. Shevchuk, A.V. «Green» construction in Russia: prerequisites, barriers, development incentives / A.V. Shevchuk, S.N. Bobylev // Economy of the region. – 2020. – Vol. 16, No. 4. – P. 1121–1135.
2. Kapitonov, S.V. Analysis of regulatory support for «green» construction in the Russian Federation / S.V. Kapitonov, R.A. Kurbanov // Housing construction. – 2021. – No. 11. – P. 45–51.
3. Simonova, I.N. Strategies of low-carbon development of Russia / I.N. Simonova, E.V. Lyashonkova, R.K. Orlenko // Actual problems of science and practice in various sectors of the national economy : Collection of reports of the VII National scientific and practical conference. – Penza, 2024. – P. 63–66.
4. Simonova, I.N. Prospects for the development of «green» construction in Russia / I.N. Simonova, E.V. Lyashonkova, D.D. Simonova // Education and science in the modern world. Innovations. – 2023. – No. 2 (45). – P. 119–124.
5. Kibert, Ch. Sustainable construction: design and delivery / Ch. Kibert. – New York : John Wiley & Sons, 2016. – 560 p.
6. Aiker, W. Energy-Efficient Buildings with Solar and Geothermal Resources / W. Aiker. – Chichester : Wiley, 2014. – 345 s.
7. Hosey, L. The Shape of Green: Aesthetics, Ecology, and Design / L. Hosey. – Washington : Island Press, 2012. – 216 p.

УДК 691.175:551.50

DOI 10.54734/20722958_2026_2_84

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарёва*

Россия, 430005, г. Саранск,
ул. Большевикская, д. 68,
тел./факс: (8342) 48-25-64, 47-71-56

Низина Татьяна Анатольевна,
доктор технических наук, профессор,
директор института архитектуры
и строительства, профессор кафедры
«Строительные конструкции»
E-mail: nizinata@yandex.ru

Низин Дмитрий Рудольфович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: nizindi@yandex.ru

Чибулаев Игорь Александрович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: chibulaev98@mail.ru

Лукачевская Ирина Григорьевна,
кандидат технических наук,
зав. лабораторией «Комплексные
климатические испытания» ФГБУН ФИЦ
«Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: mirkin1611@gmail.com

*National Research Ogarev Mordovia State
University*

Russia, 430005, Saransk,
68, Bolshevistskaya St.,
tel./fax: +7(8342) 48-25-64, 47-71-56

Nizina Tatyana Anatolievna,
Doctor of Sciences, Professor, Director of the
Institute of Architecture and Construction,
Professor of the Department «Building
structures»
E-mail: nizinata@yandex.ru

Nizin Dmitry Rudolfovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building structures»
E-mail: nizindi@yandex.ru

Chibulaev Igor Alexandrovich,
Postgraduate student of the Department
«Building structures»
E-mail: chibulaev98@mail.ru

Lukachevskaya Irina Grigoryevna,
Candidate of Sciences, Head of the
Laboratory of Complex Climate Testing,
Federal State Budgetary Scientific Institution,
Federal Research Center, Yakutsk Scientific
Center, Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
E-mail: mirkin1611@gmail.com

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2024-0095).

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УМЕРЕННОГО, СУБТРОПИЧЕСКОГО, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО И АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТОВ

Т.А. Низина, Д.Р. Низин, И.А. Чибулаев, И.Г. Лукачевская

Представлены результаты анализа актинометрических показателей умеренно континентального (г. Саранск), субтропического (г. Геленджик), экстремально холодного (г. Якутск) и арктического (пос. Тикси) климатов за календарный год, начиная с 01.12.2024 г. Исследуемые данные получены с помощью станций автоматизированного контроля метеорологических параметров с шагом 1 час. Проанализированы дневные и сезонные изменения, а также зависимость от региона показателей суммарной солнечной радиации, прямой и рассеянной составляющих и ультрафиолетового индекса (УФ-индекса), рассчитываемого в зависимости от дозы эритемного излучения в спектральном диапазоне от 250 до 400 нм. Рассчитаны суммарные дозовые значения солнечной радиации для различных уровней УФ-индекса и климатических условий. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения достоверного прогнозирования полимерной стойкости материалов, в т.ч. расчета параметров ускоренных климатических испытаний.

Ключевые слова: полимерные материалы, климатическое старение, актинометрические показатели, суммарное солнечное излучение, солнечное излучение, УФ-индекс

DURABILITY OF POLYMER MATERIALS: COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ACTINOMETRIC PARAMETERS OF TEMPERATE, SUBTROPICAL, EXTREMELY COLD AND ARCTIC CLIMATES

D.R. Nizin, T.A. Nizina, I.A. Chibulaev, I.G. Lukachevskaya

The results of the analysis of actinometric parameters of temperate continental (Saransk), subtropical (Gelendzhik), extremely cold (Yakutsk) and data were obtained from automated weather parameter monitoring stations with a 1-hour time step. Daily and seasonal variations, as well as regional dependence of total solar radiation, direct and diffuse components and ultraviolet index (UV index) calculated based on the erythemal radiation dose in the spectral range from 250 to 400 nm, were analyzed. Cumulative dose values of solar radiation for various UV index levels and climatic conditions were calculated. The obtained results are of interest from the standpoint of reliable prediction of polymer material durability, including the calculation of accelerated climatic testing parameters.

Keywords: polymeric materials, climatic aging, actinometric parameters, total solar radiation, solar radiation, UV index

Проблема оценки долговечности полимерных материалов при эксплуатации в условиях натурального климатического воздействия остается одной из ключевых задач современного материаловедения. Полимеры и композиты на их основе находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, включая авиастроение, строительство, транспорт и энергетику, где они подвергаются воздействию комплекса натуральных климатических факторов. При этом основным деструктирующим фактором, определяющим срок службы полимерных материалов в условиях открытой атмосферы, является солнечная радиация, в том числе её ультрафиолетовая составляющая [1–3].

Воздействие солнечного излучения на полимеры приводит к фотохимическим реакциям деструкции, сопровождающимся разрывом макромолекулярных цепей, образованием свободных радикалов и изменением надмолекулярной структуры материала [4]. Энергия ультрафиолетового излучения с длиной волны менее 400 нм достаточна для разрыва большинства ковалентных связей в органических полимерах, включая связи C–C (энергия ~80 ккал/моль), C–H (98 ккал/моль) и C=C (145 ккал/моль). Помимо прямого фотолитического воздействия, солнечная радиация вызывает значительный перегрев поверхности материала, что активизирует термоокислительные процессы деградации [5].

Количественная оценка воздействия солнечной радиации на полимеры традиционно осуществляется путем проведения натуральных климатических испытаний в различных климатических зонах или ускоренных лабораторных испытаний с использованием искусственных источников излучения [3]. Однако существующие методики испытаний преимущественно ориентированы на учет интегральных доз облучения без детального анализа влияния различных актинометрических параметров: интенсивности суммарной солнечной радиации, прямого и рассеянного излучения, суточных и сезонных вариаций и др. [6].

Актинометрические показатели, характеризующие режим солнечной радиации, включают прямую, рассеянную и суммарную радиацию, а также ультрафиолетовую составляющую спектра в диапазонах УФ-А (315–400 нм), УФ-В (280–315 нм) и УФ-С (100–280 нм) [2]. Известно, что интенсивное воздействие различных составляющих солнечного спектра оказывает неоднозначное влияние на кинетику деградационных процессов в полимерах [7]. При этом наибольшую деструктивную активность проявляет излучение в диапазоне длин волн 290–320 нм, энергия которого достаточна для инициирования фотохимических реакций в большинстве органических полимеров.

В последние годы активно развиваются методы прогнозирования климатической стойкости материалов на основе математического моделирования с учетом реальных климатических данных [2, 8–10]. Применение автоматизированных метеорологических станций с актинометрическими комплексами позволяет осуществлять непрерыв-

ный мониторинг параметров солнечной радиации и устанавливать корреляционные зависимости между дозой облучения и изменением свойств материалов. Особый интерес представляет изучение влияния интенсивности солнечной радиации на физико-механические и декоративные характеристики полимеров. Исследования изменения оптических свойств полипропилена показали, что процесс деградации, вызванный ультрафиолетовым излучением, приводит к значительным изменениям оптических свойств материала [11]. Для эпоксидных композиционных материалов установлена зависимость скорости старения от сезонности воздействия климатических факторов, что связано с варьированием интенсивности солнечной радиации в течение года [12].

Целью настоящей работы является анализ изменения актинометрических показателей в четырех различных климатах – умеренно континентальном, субтропическом, экстремально холодном и арктическом – с 01.12.2024 в течение одного календарного года. Данный временной период соответствует натурным климатическим испытаниям, реализуемым в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWS-2024-0095). Фиксация метеорологических показателей осуществлялась с помощью станций автоматического контроля, расположенных на метеоплощадках в г. Саранске (умеренно континентальный климат), г. Геленджике (субтропический климат), г. Якутске (экстремально холодный климат) и пос. Тикси (арктический климат).

Анализ изменения температуры, относительной и абсолютной влажности для четырех вышеуказанных климатических зон за 2019 – 2023 гг. представлен в работе [13], результаты исследования климатической стойкости полимерных материалов в течение первых шести месяцев натурального экспонирования – в [14].

Проанализируем результаты изменения суммарной солнечной радиации, фиксируемой с частотой 1 час в четырех исследуемых климатах (рис. 1), на примере июля 2025 года, являющегося наиболее характерным периодом с точки зрения интенсивности климатического воздействия для значительного числа регионов России. Анализ полученных данных демонстрирует суточную цикличность изменения суммарной солнечной радиации от 0 до максимального уровня, существенно зависящую от климатического региона и значительно варьирующуюся день ото дня. Существенное снижение интенсивности суммарной солнечной радиации даже в пределах одного месяца связано с повышенной облачностью в определенные дни и выпадением осадков.

Суммарная солнечная радиация Q включает в себя прямую S и рассеянную D компоненты (прямое и рассеянное излучение):

$$Q = S + D. \quad (1)$$

Прямая радиация S поступает на поверхность в виде пучка параллельных лучей, исходящих непосредственно от видимого диска солнца; рассеянная D – со всего небосвода после рассеяния в атмосфере. Рассеянная радиация не создаёт теней и преобладает в пасмурную погоду.

Интенсивность прямого солнечного излучения зависит от угла падения лучей и рассчитывается по формуле

$$S = S_0 \cdot \sin(h), \quad (2)$$

где S_0 – интенсивность прямой солнечной радиации, поступающей на перпендикулярную поверхность, Вт/м²; h – высота Солнца над горизонтом (угол возвышения Солнца), градусы.

Угол возвышения Солнца зависит от географической широты φ ; склонения Солнца δ , меняющегося в течение года; часового угла ω , варьирующегося от времени суток. Высота солнца над горизонтом связана с географической широтой, склонением Солнца и часовым углом следующей зависимостью:

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega). \quad (3)$$

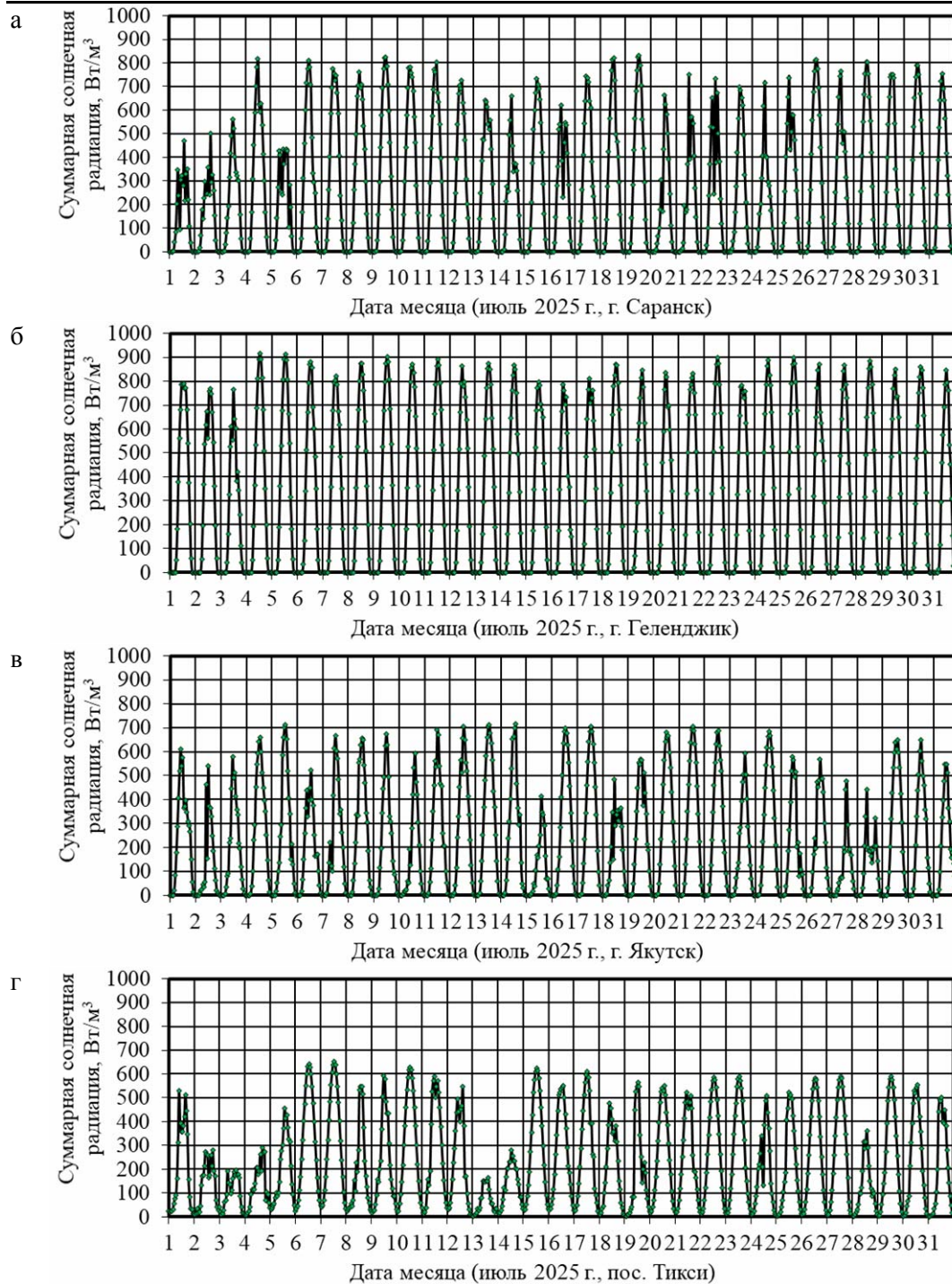


Рис. 1. Изменение интенсивности суммарной солнечной радиации в июле 2025 года в различных климатических зонах:

а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

Изменение интенсивности суммарной солнечной радиации, прямого и рассеянного излучения в течение одного календарного года, фиксируемого с 01.12.2024 года, представлено соответственно на рис. 2–4. Из анализа изменения суммарной солнечной радиации (см. рис. 2) выявлено значительное снижение максимальных уровней данного актинометрического показателя в зимние месяцы (особенно в декабре и январе) для умеренно континентального (рис. 2, а) и экстремально холодного (рис. 2, в) климатов. При этом для арктического климата в период с 1 декабря 2024 г. по 28 января 2025 г. и с 14 по 30 ноября 2025 года показатели солнечной радиации принимают

нулевые значения, что связано с наступлением полярной ночи (рис. 2, г). Наименьшее снижение суммарной солнечной радиации в зимние месяцы наблюдается в субтропическом климате (рис. 2, б).

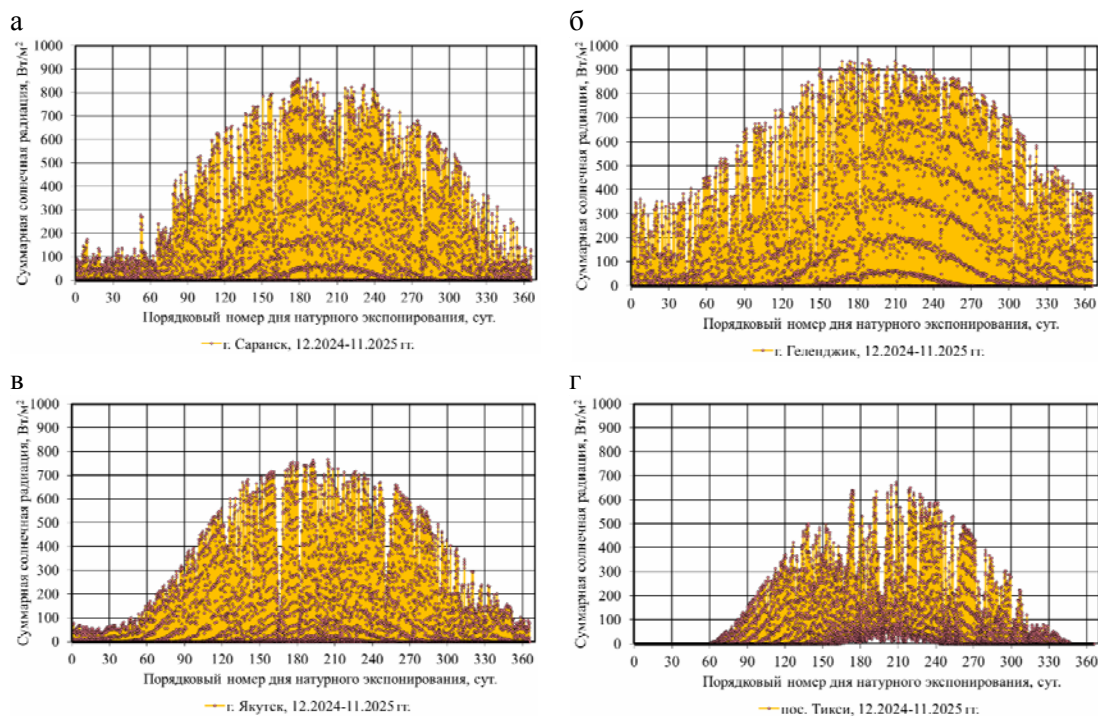


Рис. 2. Изменение интенсивности суммарной солнечной радиации в течение одного календарного года в различных климатических зонах: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

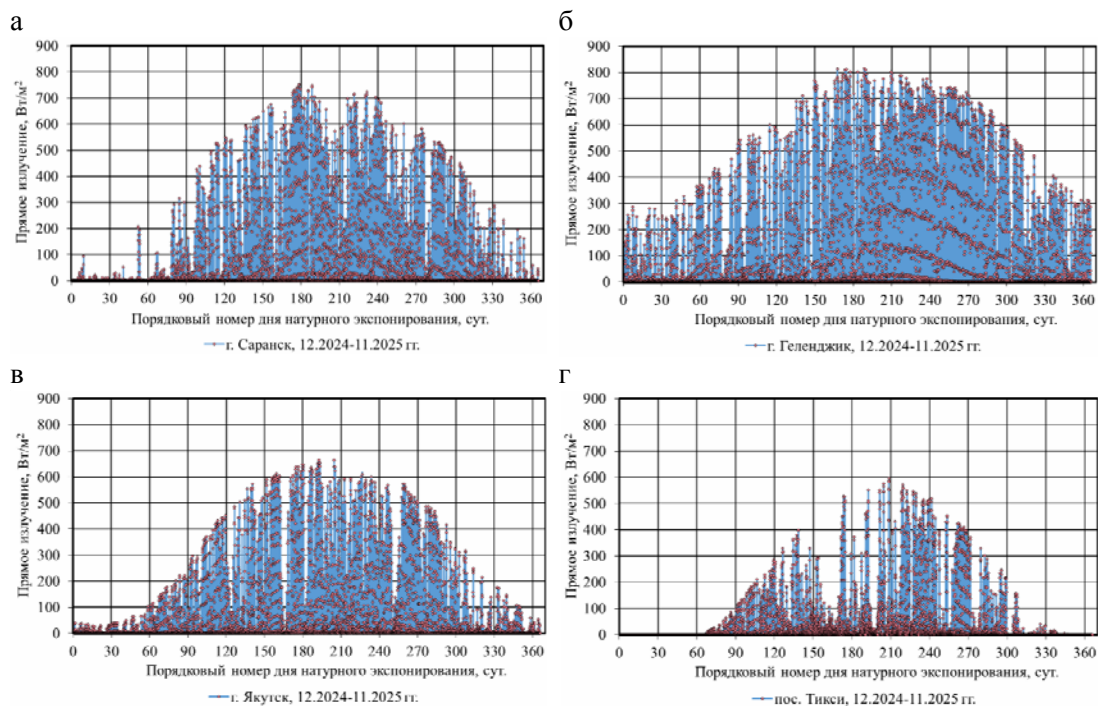


Рис. 3. Изменение интенсивности прямого солнечного излучения в течение одного календарного года в различных климатических зонах: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

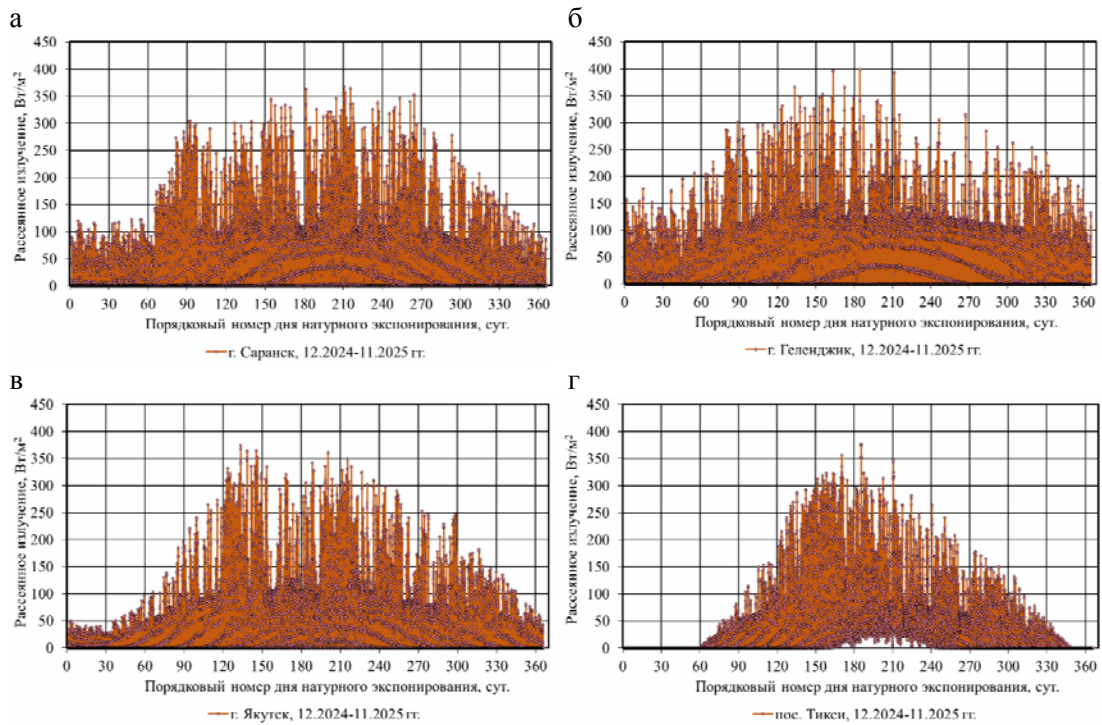


Рис. 4. Изменение интенсивности рассеянного солнечного излучения в течение одного календарного года в различных климатических зонах:
 а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик);
 в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

Общая картина соотношения максимальных уровней интенсивности прямого излучения (см. рис. 3) в зависимости от климатической зоны подобна показателям суммарной солнечной радиации (см. рис. 2): максимальные уровни зафиксированы для г. Геленджика (рис. 3, б), минимальные – для пос. Тикси (рис. 3, г). При этом визуально можно идентифицировать дни с повышенной облачностью (см. рис. 3), для которых прямое солнечное излучение резко отличается от смежных периодов времени, что особенно характерно для арктического климата даже в летний период. Также следует отметить, что во время полярного дня (пос. Тикси), когда солнце не заходит за горизонт дольше 24 часов, суммарная солнечная радиация представлена исключительно рассеянной компонентой (см. рис. 2–4, г).

Графическая интерпретация соотношений накопленных месячных значений прямого и рассеянного излучений в составе суммарной солнечной радиации представлена на рис. 5. Установлено, что наибольшие уровни накопленной за один календарный месяц суммарной солнечной радиации достигаются для субтропического климата с мая по август; для умеренно континентального, экстремально холодного и арктического климатов – с мая по июль. При этом для всех анализируемых месяцев доля прямого излучения в составе суммарной солнечной радиации для субтропического климата составляет ~50 % и более (максимальные уровни, достигающие 72,1÷77,6 %, зафиксированы с июня по сентябрь). Для арктического климата, напротив, доля прямого излучения превышает 50 % от суммарного показателя лишь для двух месяцев (июль и август).

Для оценки интенсивности ультрафиолетового излучения, в том числе в области здравоохранения и метеорологии, достаточно часто используется показатель ультрафиолетового индекса (УФ-индекс), рассчитываемый в зависимости от дозы эритемного излучения (спектральный диапазон от 250 до 400 нм). Характеристика уровней в зависимости от количественных значений УФ-индекса приведена в таблице. Известно [15], что безопасным для человека считается уровень УФ-индекса, не превышающий двух. В вопросах климатического старения полимерных материалов

интенсификация деградационных процессов соответствует УФ-индексу выше уровня 3 (умеренный, см. таблицу).

Характеристика уровней ультрафиолетового индекса в зависимости от диапазона [15]

Диапазон значений УФ-индекса	<2	3-5	6-7	8-10	>11
Характеристика уровней	Низкий	Умеренный	Высокий	Очень высокий	Экстремальный

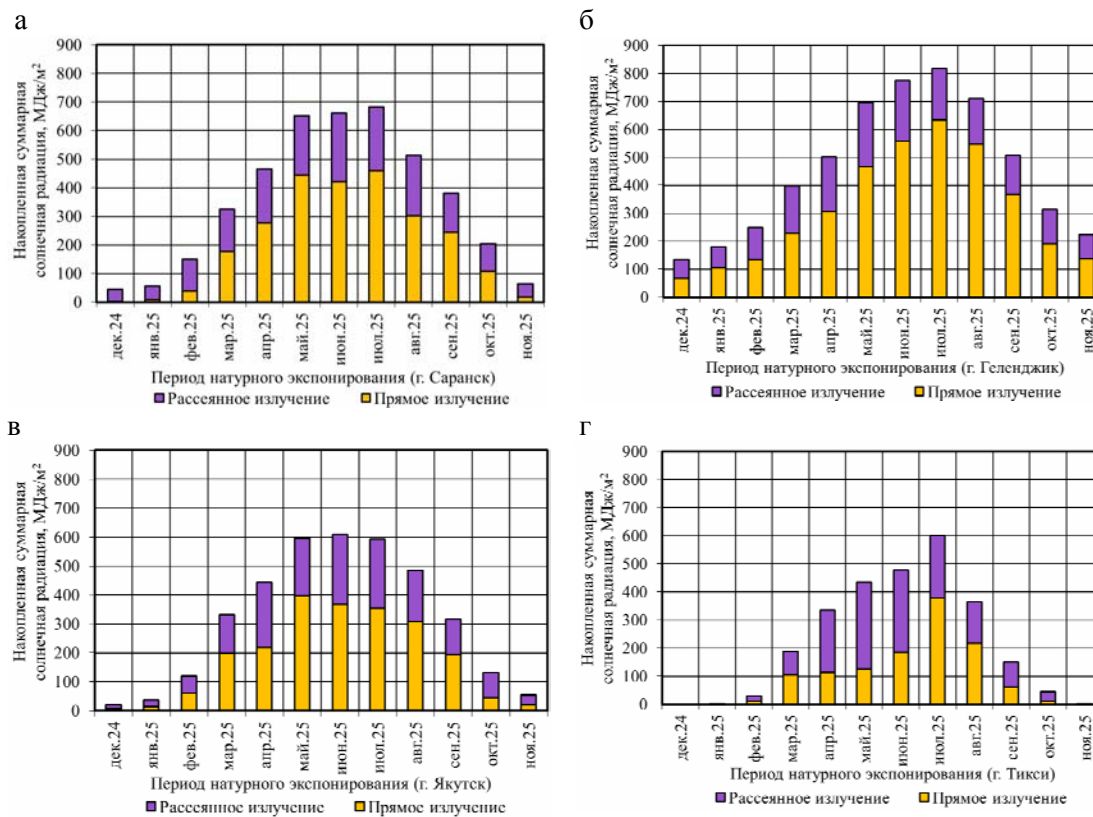


Рис. 5. Гистограммы накопленных месячных излучений (прямое и рассеянное) в составе суммарной солнечной радиации для различных климатических зон: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

Из анализа изменения ультрафиолетового индекса в течение одного календарного года для четырех различных климатических зон следует (рис. 6), что активное воздействие УФ-излучения превалирует с марта по сентябрь/октябрь для соответственно умеренно континентального/субтропического климатов и с апреля по август/сентябрь – для арктического/экстремально холодного климатов.

Учитывая варьирование актинометрических показателей в течение суток (см. рис. 1) от близких к нулю до максимальных значений, зависящих в том числе от сезона, для получения количественных показателей, предназначенных в дальнейшем для моделирования процессов климатического старения, произведем расчет совокупной продолжительности представленности УФ-индекса различной интенсивности (от единицы до максимума для анализируемого климата). По результатам расчетов установлено (рис. 7), что продолжительность периодов с ненулевыми уровнями УФ-индекса для четырех анализируемых климатических зон варьируется в достаточно узком интервале – от 52,1 до 53,4 % от общей длительности климатического воздействия, равной для одного календарного года 8760 (365×24) часам.

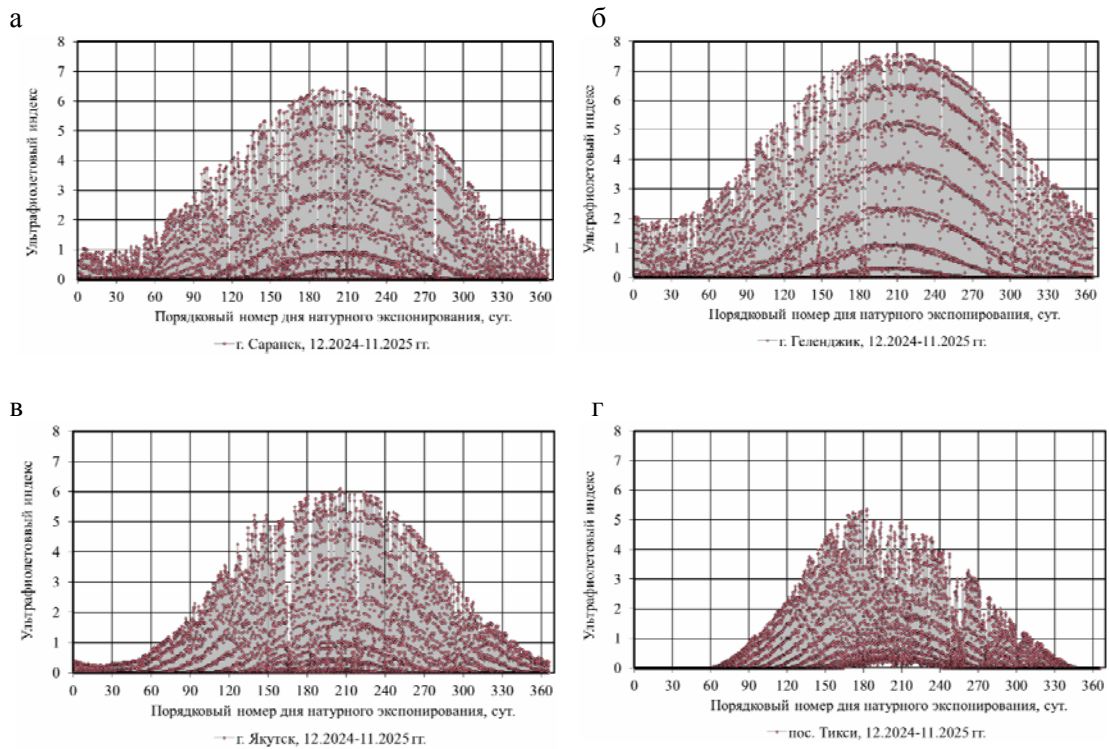


Рис. 6. Изменение интенсивности ультрафиолетового индекса в течение одного календарного года в различных климатических зонах: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

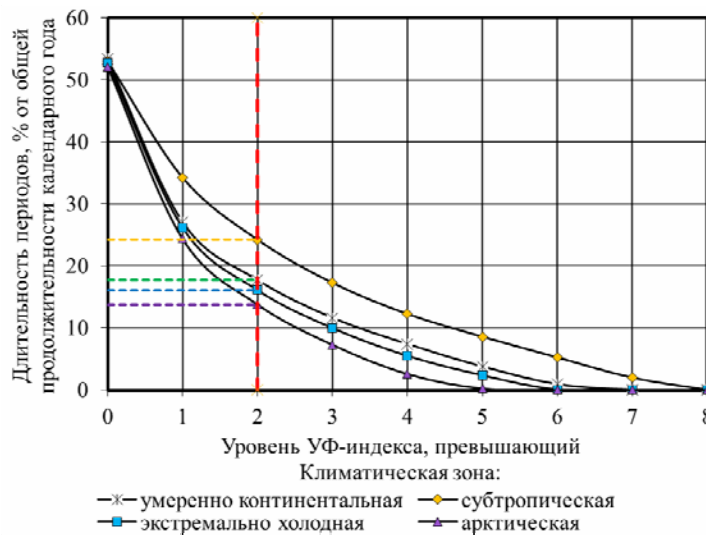


Рис. 7. Изменение длительности временных интервалов, для которых используются ограничения по уровню УФ-индекса

При этом из-за наложения ограничений по ультрафиолетовому индексу для уровней от 1 до 8 значительно снижается совокупная продолжительность воздействия УФ-излучения, уменьшаясь в ряду: субтропический → умеренно континентальный → экстремально холодный → арктический климат. Длительность периода при ограничении УФ-индекса уровнем 2 для вышеперечисленных климатических зон соответствует 24,2; 17,7; 16,1 и 13,8 % от общей продолжительности натурального экспонирования, что составляет 2121, 1552, 1411 и 1208 часов соответственно.

Наиболее значимыми с точки зрения климатического старения при этом следует считать временные участки, совмещающие суммарное солнечное излучение высокой интенсивности и значения УФ-индекса выше 3 единиц. Для рассчитанных временных диапазонов определим накопленные значения суммарной солнечной радиации, полного и рассеянного излучения для различных уровней УФ-индекса. Графические зависимости изменения вышеуказанных актинометрических показателей в зависимости от месяца натурального экспонирования представлены на рис. 8-10.

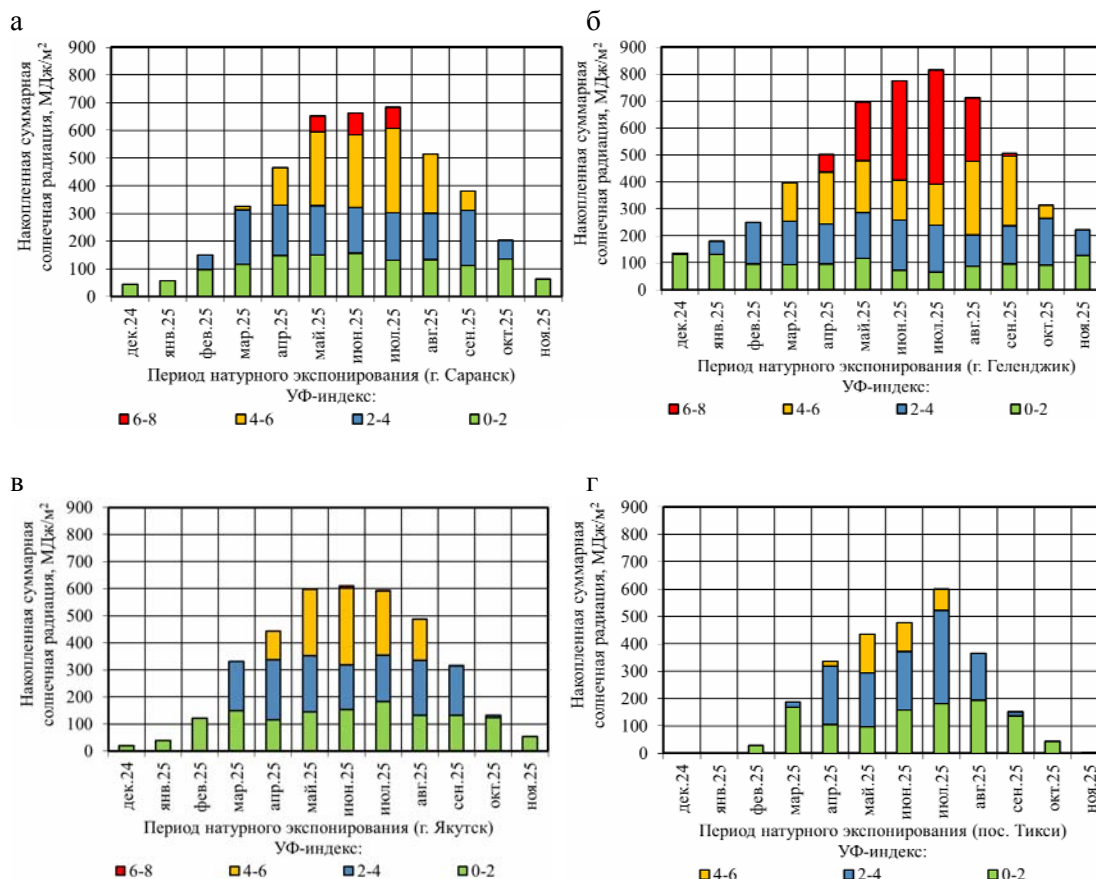


Рис. 8. Изменение накопленной суммарной солнечной радиации в зависимости от месяца натурального экспонирования и уровня ультрафиолетового индекса в различных климатических зонах:

- а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик);
- в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

По результатам произведенных расчетов также четко прослеживается влияние различных климатических зон на уровни накопленных показателей (рис. 11). Например, при ограничении допустимого уровня УФ-индекса критерием >2 или >3 следует, что для умеренно континентального климата годовые накопленные уровни суммарной солнечной радиации достигают соответственно 2853,7 и 2125,5 МДж/м², субтропического – 4300,3 и 3490,5 МДж/м², экстремально холодного – 2382,1 и 1684,4 МДж/м², арктического – 1514,7 и 906,7 МДж/м². Подобные расчеты могут быть выполнены для других видов актинометрических показателей.

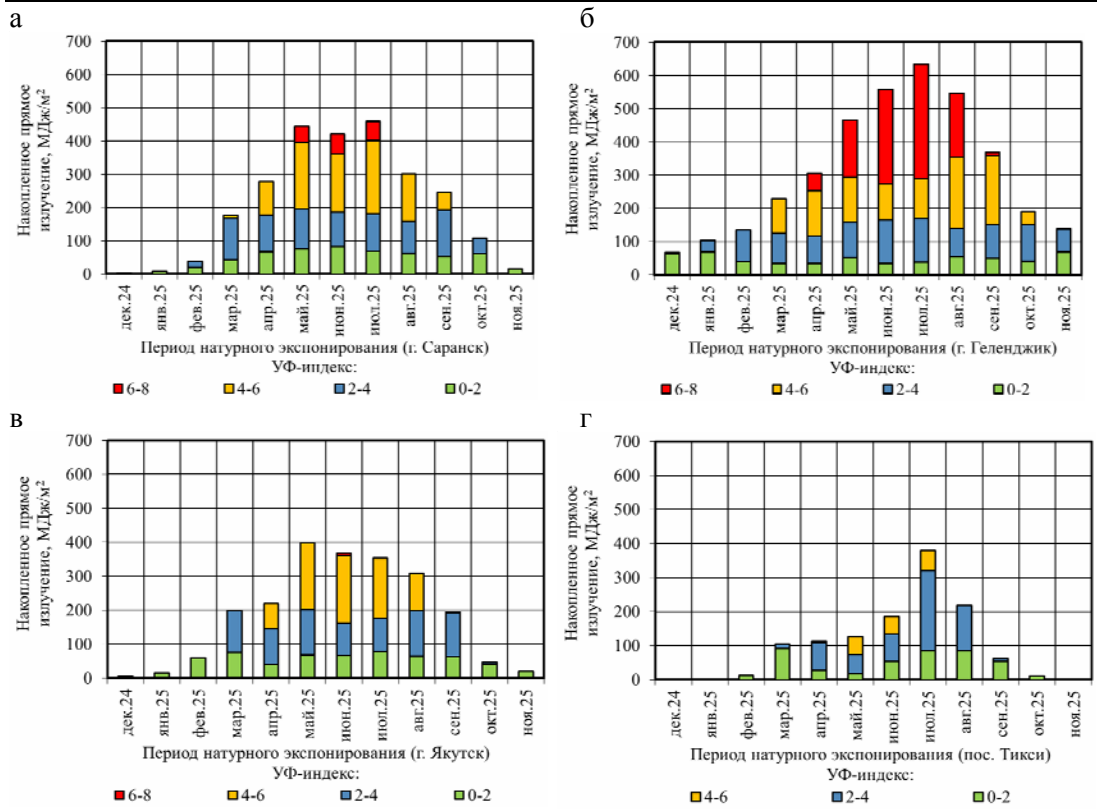


Рис. 9. Изменение накопленной дозы прямого излучения в зависимости от месяца натурального экспонирования и уровня ультрафиолетового индекса в различных климатических зонах: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

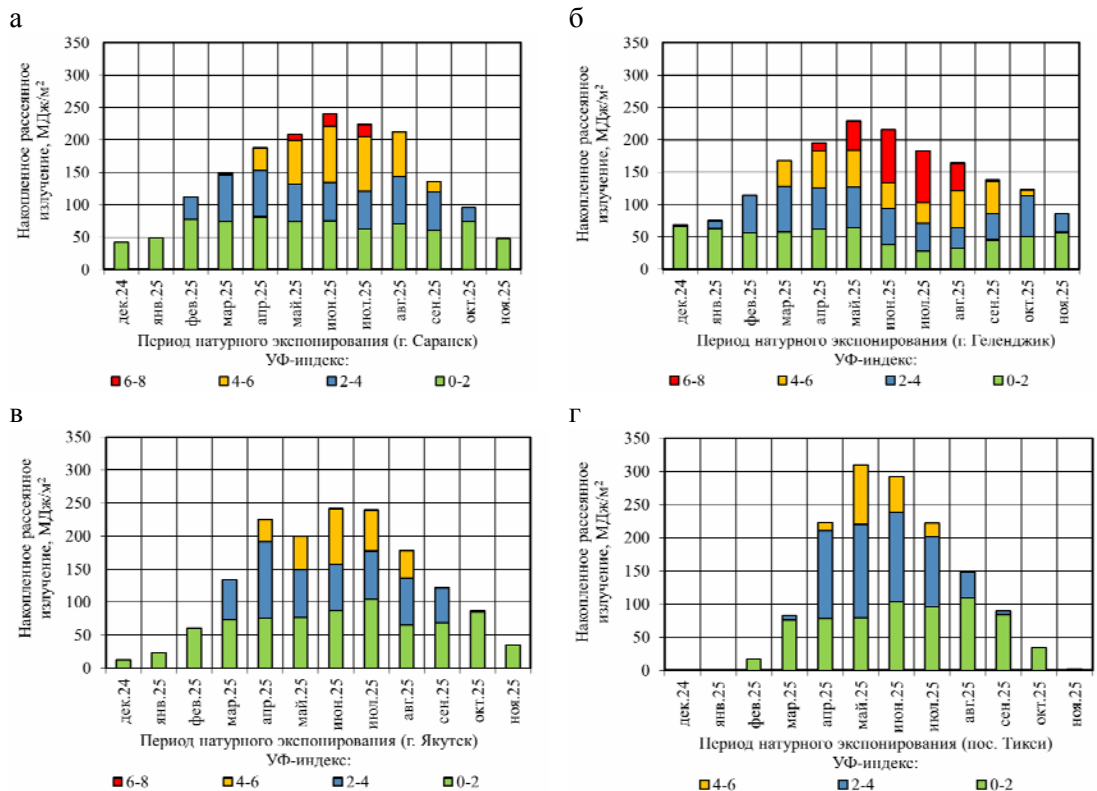


Рис. 10. Изменение накопленной дозы рассеянного излучения в зависимости от месяца натурального экспонирования и уровня ультрафиолетового индекса в различных климатических зонах: а – умеренно континентальной (г. Саранск); б – субтропической (г. Геленджик); в – экстремально холодной (г. Якутск); г – арктической (пос. Тикси)

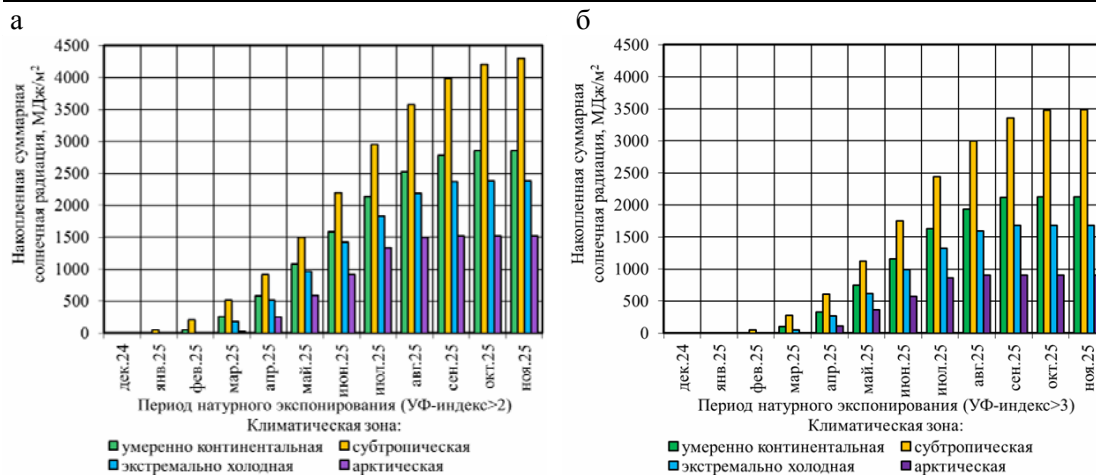


Рис. 11. Кинетика накопления суммарной солнечной радиации в процессе натурального экспонирования в течение одного календарного года при ограничении уровня УФ-индекса: а – более 2; б – более 3

Заключение

Определение количественной зависимости климатической стойкости от уровня ультрафиолетового воздействия требует проведения дополнительных исследований, однако подобный подход в дальнейшем может быть использован для расчета ключевых параметров ускоренных климатических испытаний полимерных материалов, изделий и конструкций.

Список литературы

1. Павлов, М.Р. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор) / М.Р. Павлов, Е.В. Николаев, Н.П. Андреева, С.Л. Барботько // Труды ВИАМ. – 2016. – № 7 (43). – С. 98–112.
2. Низина, Т.А. «Большие данные» при прогнозировании климатической стойкости строительных материалов. Актинометрические показатели / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, И.А. Чибулаев, И.П. Спирин, Н.А. Пивкин // Academia. Архитектура и строительства. – 2024. – №4. – С. 124–133.
3. Лаптев, А.Б. Источники светового излучения для имитации старения полимерных материалов под воздействием солнечной радиации / А.Б. Лаптев, М.Р. Павлов, Т.О. Зеленева // Труды ВИАМ. – 2024. – № 5 (135). – С. 71–82.
4. Старцев, О.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях / О.В. Старцев, И.М. Медведев, А.С. Кротов, С.В. Панин // Коррозия: материалы, защита. – 2013. – № 7. – С. 43–47.
5. Каблов, Е.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 34–40.
6. Кириллов, В.Н. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата / В.Н. Кириллов, Ю.М. Вапиров, Е.А. Дрозд // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 4. – С. 31–38.
7. Старцев, О.В. Исследование механизма старения органотекстолита в субтропическом климате / О.В. Старцев, В.П. Мелетов, Б.В. Перов, Г.П. Машинская // Механика композитных материалов (Рига). – 1986. – № 3. – С. 462–467.
8. Гусев, Е.Л. Математические методы прогнозирования долговечности стеклопластиков при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды / Е.Л. Гусев, Ю.Ю. Федоров // EURASTRENCOLD-2025. – 2025. – Вып. 1. – С. 279–283.

9. Старцев, О.В. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата / О.В. Старцев, М.П. Лебедев, А.К. Кычкин // Известия Алтайского государственного университета. – 2020. – №1 (111). – С. 41–51.
10. Низина, Т.А. Моделирование влияния актинометрических параметров на изменение декоративных характеристик эпоксидных композитов, экспонированных в натуральных условиях / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, А.Н. Чернов // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 2. – С. 27–36.
11. Горончко, В.А. Оптические, электрические, механические свойства и радиационная стойкость полипропилена, модифицированного наночастицами оксидных соединений : дис. ... канд. наук / В.А. Горончко ; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – Томск, 2023. – 126 с.
12. Селяев, В.П. Воздействие сезонности на натурное климатическое старение эпоксидных полимеров / В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Т.А. Низина, А.Н. Чернов, А.И. Горенкова // Эксперт: теория и практика. – 2020. – №1 (4). – С. 43–49.
13. Низина, Т.А. Комплексный анализ количественных значений метеорологических факторов для умеренного, субтропического, экстремально холодного и арктического климатов / Т.А. Низина, И.А. Чибулаев, Д.Р. Низин, И.П. Спиринов, Н.А. Пивкин // Эксперт: теория и практика. – 2024. – №4. – С.80–87.
14. Низин, Д.Р. Натурное климатическое старение эпоксидных полимеров строительного назначения в умеренном, субтропическом, экстремально холодном и арктическом климате // Д.Р. Низин, Т.А. Низина, И.Г. Лукачевская, И.А. Чибулаев, И.П. Спиринов, Н.А. Пивкин // Региональная архитектура и строительство, 2025. – №4. – С. 90–105.
15. Global Solar UV Index: A Practical Guide / World Health Organization. – Geneva : WHO, 2002. – 28 p.

References

1. Pavlov, M.R. On the methodology for assessing the resistance of polymer materials to solar radiation exposure (review) / M.R. Pavlov, E.V. Nikolaev, N.P. Andreeva, S.L. Barbotko // Trudy VIAM. – 2016. – No. 7 (43). – P. 98–112.
2. Nizina, T.A. «Big data» in predicting the climatic resistance of construction materials. Actinometric indicators / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, I.A. Chibulaev, I.P. Spirin, N.A. Pivkin // Academia. Architecture and Construction. – 2024. – No. 4. – P. 124–133.
3. Laptev, A.B. Light radiation sources for simulating aging of polymer materials under solar radiation exposure / A.B. Laptev, M.R. Pavlov, T.O. Zeleneva // Trudy VIAM. – 2024. – No. 5 (135). – P. 71–82.
4. Startsev, O.V. Dependence of sample surface temperature on climate characteristics during natural exposure / O.V. Startsev, I.M. Medvedev, A.S. Krotov, S.V. Panin // Corrosion: Materials, Protection. – 2013. – No. 7. – P. 43–47.
5. Kablov, E.N. Climatic aging of aviation composite materials. III. Significant aging factors / E.N. Kablov, O.V. Startsev, A.S. Krotov, V.N. Kirillov // Deformation and Fracture of Materials. – 2011. – No. 1. – P. 34–40.
6. Kirillov, V.N. Investigation of atmospheric resistance of polymer composite materials under warm humid and moderately warm climate conditions / V.N. Kirillov, Yu.M. Vapirov, E.A. Drozd // Aviation Materials and Technologies. – 2012. – No. 4. – P. 31–38.
7. Startsev, O.V. Investigation of the aging mechanism of organic textolite in subtropical climate / O.V. Startsev, V.P. Meletov, B.V. Perov, G.P. Mashinskaya // Mechanics of Composite Materials (Riga). – 1986. – No. 3. – P. 462–467.
8. Gusev, E.L. Mathematical methods for predicting the durability of fiberglass under extreme environmental climatic factors / E.L. Gusev, Yu.Yu. Fedorov // EURASTRENCOLD-2025. – 2025. – Issue 1. – P. 279–283.
9. Startsev, O.V. Aging of polymer composite materials under extremely cold climate conditions / O.V. Startsev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin // Izvestiya of Altai State University. – 2020. – No. 1 (111). – P. 41–51.

10. Nizina, T.A. Modeling the influence of actinometric parameters on changes in decorative characteristics of epoxy composites exposed under natural conditions / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, A.N. Chernov // *Regional Architecture and Engineering*. – 2015. – No. 2. – P. 27–36.
11. Goronchko, V.A. Optical, electrical, mechanical properties and radiation resistance of polypropylene modified with oxide compound nanoparticles : PhD dissertation / V.A. Goronchko ; National Research Tomsk Polytechnic University. – Tomsk, 2023. – 126 p.
12. Selyaev, V.P. The impact of seasonality on natural climatic aging of epoxy polymers / V.P. Selyaev, D.R. Nizin, T.A. Nizina, A.N. Chernov, A.I. Gorenkova // *Expert: Theory and Practice*. – 2020. – No. 1 (4). – P. 43–49.
13. Nizina, T.A. Comprehensive analysis of quantitative values of meteorological factors for temperate, subtropical, extremely cold and Arctic climates / T.A. Nizina, I.A. Chibulaev, D.R. Nizin, I.P. Spirin, N.A. Pivkin // *Expert: Theory and Practice*. – 2024. – No. 4. – P. 80–87.
14. Nizin, D.R. Natural climatic aging of construction epoxy polymers in temperate, subtropical, extremely cold and Arctic climates / D.R. Nizin, T.A. Nizina, I.G. Lukachevskaya, I.A. Chibulaev, I.P. Spirin, N.A. Pivkin // *Regional Architecture and Engineering*. – 2025. – No. 4. – P. 90–105.
15. *Global Solar UV Index: A Practical Guide* / World Health Organization. – Geneva : WHO, 2002. – 28 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.072

DOI 10.54734/20722958_2026_2_97

*Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Шеин Александр Иванович,

доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Механика»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Быков Александр Николаевич,
аспирант кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Shein Aleksandr Ivanovich,

Doctor of Sciences, Professor,
Head of the Department «Mechanics»
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Bykov Aleksander Nikolaevich,
Postgraduate of the Department «Mechanics»

ПЕРЕКРЕСТНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗЕЙ С ГИДРОЦИЛИНДРАМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРКАСОВ

А.И. Шеин, А.Н. Быков

Представлен способ демпфирования колебаний как результат применения трех систем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти три отдельные системы демпфирования в сумме образуют интегральную систему снижения уровня колебаний пространственного железобетонного каркаса производственного здания. Показан алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок в работу демпфируемой системы связи – каркас и снижения уровня колебаний каркаса. Из цикла решений дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы с вариациями сопротивления движению и/или параметров колонн подбираются оптимальные, для данных возмущений, коэффициент сопротивления движению поршня в демпфере и механические характеристики колонн и балок.

Ключевые слова: демпфирование, колебания, вертикальные связи, железобетонный каркас одноэтажного промышленного здания, дифференциальные уравнения движения, сейсмограмма, сейсмическая защита

CROSS-LINKAGE SYSTEMS WITH HYDROCYLINDERS FOR PROTECTING REINFORCED CONCRETE INDUSTRIAL FRAMES

A. I. Shein, A.N. Bykov

The article presents a method for damping vibrations which is a result of the use of three systems of cable connections equipped with single-acting hydraulic cylinders. These three separate damping systems together form an integrated system for reducing the level of vibrations in the spatial

reinforced concrete frame of an industrial building. The article also presents an algorithm for finding a safe way to include columns and beams in the damping system, the frame and reducing the level of the frame variation. From the cycle of solving differential equations of the damped system movement resistance and/or columns parameters optimal coefficient of piston movement resistance in damper and mechanical characteristics of columns and beams are selected.

Keywords: damping, vibrations, vertical connections, reinforced concrete frame of a single-storey industrial building, differential equations of motion, seismogram, seismic protection

Достижение полной безопасности зданий и сооружений в условиях сейсмической активности возможно благодаря заблаговременному внедрению сейсмостойких конструктивных решений. Ключевым аспектом здесь является применение инновационных систем демпфирования уже на стадии разработки проекта.

Проводились исследования влияния геометрических особенностей элементов железобетонного каркаса здания на характеристики его собственных колебаний [1]. Были проанализированы семь различных проектных решений многоэтажного здания, в которых изменялись размеры поперечных сечений стен лифтовых шахт, диафрагм жесткости и плит перекрытий. Путем динамического моделирования были определены максимальные смещения верхней точки перекрытий, а также частоты и периоды собственных колебаний. Проведен анализ полученных данных, демонстрирующий, как изменение жесткости элементов каркаса влияет на формы и частоты колебаний. В работе даны рекомендации по выбору оптимального проектного решения каркаса с учетом желаемых параметров собственных колебаний.

Известно, что для большинства строительных конструкций присуще разнородное демпфирование в их элементах. В рамках исследования [2] ставится задача формирования матрицы гистерезисного демпфирования, включающая информацию о внутреннем трении в материалах. Теоретической основой работы выступает обобщенная гипотеза Е.С. Сорокина, постулирующая пропорциональность матриц демпфирования и жесткости конструктивных элементов. Представленная методика может быть использована при проведении расчетов сейсмостойкости конструкций.

Современные технологические достижения и разработка новых наноматериалов открывают перспективные пути для совершенствования демпфирующих способностей вязкоупругих систем и расширения их функционала. Это дает возможность формировать демпфирующие жидкости с точно заданными, термостабильными вязкостными характеристиками. В работах [3-4] представлены результаты исследования проблемы демпфирования колебаний зданий с помощью ленточно-тросовых систем с вязкоупругими гидроцилиндрами, рассеивающими энергию колебательных движений.

Различные способы демпфирования колебаний механических систем рассмотрены в [5-10].

В данной работе приводятся новые способы устройства вертикальных связей для защиты железобетонных промышленных каркасов в трех направлениях: устройство трех систем вертикальных тросовых связей с гидроцилиндрами одностороннего действия. Этот способ комплектуется системой управления клапанами гидроцилиндров и поэтому относится к полуактивному способу демпфирования колебаний.

Конструкцию промышленных зданий (рис. 1) можно представить совокупностью поперечных и продольных рам.

Для противодействия продольным нагрузкам, таким, как ветровые или крановые, поперечные рамы соединяются вертикальными связями, обеспечивающими пространственную жесткость. Эти связи выполнялись в виде перекрестных стержневых систем для противодействия смещениям каркаса в продольном направлении. Сейсмические воздействия можно представить трехмерной акселерограммой, которую можно ориентировать относительно каркаса цеха вдоль, поперек и по вертикали. При сейсмических воздействиях, когда волна распространяется вдоль здания, эти связи сталкиваются с критическими воздействиями инерционных сил. Значительные инерционные силы, возникающие в массивном покрытии, передаются как на несущие вертикальные элементы каркаса (вызывая сжатие с изгибом), так и на сами связи (растяжение-сжатие). Проблема заключается в том, что стандартные стальные перекрестные связи,

повсеместно применяемые в строительстве, не способны выдержать эти нагрузки. Сжатые связи быстро теряют устойчивость, что приводит к перераспределению усилий на растянутые связи. При сильных землетрясениях эти растягивающие напряжения могут превысить предел прочности материала, вызывая разрыв связей. Последствия этого катастрофичны: амплитуда колебаний здания резко возрастает, создавая высокий риск обрушения. Попытка усилить связи за счет увеличения их сечения также не решает проблему, поскольку это может привести к разрушению железобетонных колонн в местах крепления из-за сдвиговых эффектов. В направлении, перпендикулярном цеху, сопротивление сейсмическим волнам достигается исключительно за счет жесткости узлов поперечных рам, а по вертикали – за счет жесткости типовых ферм или балок, что далеко не всегда гарантирует необходимую прочность и устойчивость.

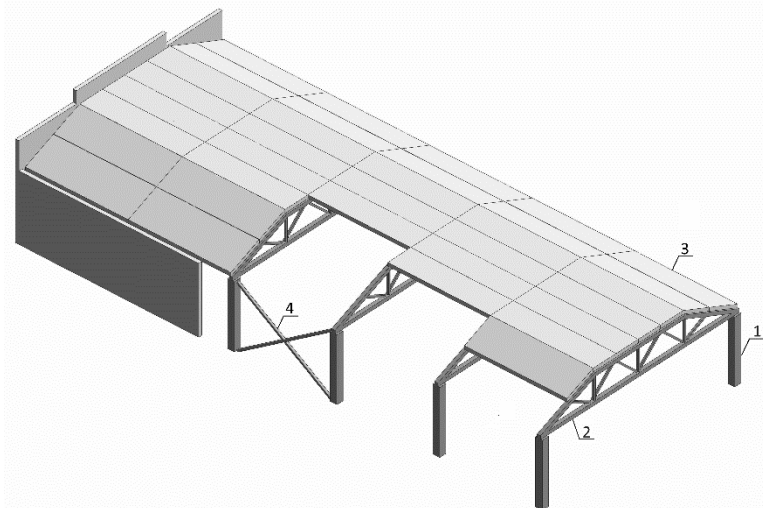


Рис. 1. Общий вид железобетонного каркаса:

1 – колонна; 2 – балка или ферма; 3 – плиты покрытия; 4 – стальные связи

В регионах с сейсмической активностью для обеспечения безопасной работы конструкций производственных цехов предлагается использовать три системы демпфирующих связей: систему продольных перекрестных связей, включающую два тросовых демпфера с гидроцилиндрами одностороннего действия; систему поперечных связей, также включающую два тросовых демпфера с гидроцилиндрами одностороннего действия; систему связей-затяжек для демпфирования вертикальных колебаний каждой фермы (балки), оснащаемую одним гидроцилиндром. При сейсмических воздействиях в растягивающихся элементах перекрестной системы будет происходить натяжение тросов, что приведет к выдвиганию штоков гидроцилиндров, сопровождающемуся значительными усилиями. В свою очередь, сжимающиеся элементы будут способствовать ослаблению натяжения тросов и втягиванию штоков гидроцилиндров за счет действия возвратной пружины. Энергия колебаний будет эффективно рассеиваться в рабочих полостях гидроцилиндров и в элементах, подверженных упруго-пластическому изгибу. Ход гидроцилиндров необходимо ограничивать, чтобы при достижении предельных отклонений колонн или ферм демпферы переходили в режим работы ограничителя. Принцип действия одностороннего гидроцилиндра в данной системе заключается в следующем: усилие, передаваемое от натянутого троса на шток, нагнетает давление рабочей жидкости в гидроцилиндре, вытесняя ее в дополнительную полость. Таким образом, усилие создается только в одном направлении (рабочий ход). Возврат поршня в исходное положение осуществляется под действием возвратной пружины, которая затягивает жидкость из дополнительной полости через вспомогательный клапан. Эта особенность делает поршневые гидроцилиндры одностороннего действия оптимальными для систем управления колебательными движениями.

Для оценки эффективности предлагаемой системы связей рассмотрена рама промышленного однопролетного каркаса с двумя рядами колонн продольного направления и со связями, расположенными в среднем пролете (рис. 2). Несущие элементы – железобетонные колонны и двухскатные железобетонные балки; узлы крепления – шарнирные. Сооружение подвергалось сейсмическому нагружению, которое имитировалось акселерограммой или гармоническим движением опорных узлов сооружения. Расчетная схема изображена на рис. 2.

Для восприятия инерционных сил, действующих **вдоль цеха**, и гашения колебаний устанавливается перекрестная вертикальная ленточно-тросовая система гашения колебаний с гидроцилиндрами одностороннего действия (рис. 2, 3). В качестве несущих элементов вертикальных связей используются канаты, где несущая способность канатов, помимо высокого предела прочности на растяжение, дополнительно подстраховывается ходом поршня гидроцилиндра. Рассмотрим движение каркаса под воздействием вектора пространственной (трехмерной) системы переносных ускорений $\ddot{\Delta}$. Полагая, что переносное движение осуществляется вдоль цеха, будем максимальное горизонтальное ускорение $\ddot{\Delta}_x$ ориентировать вдоль линии колонн каркаса.

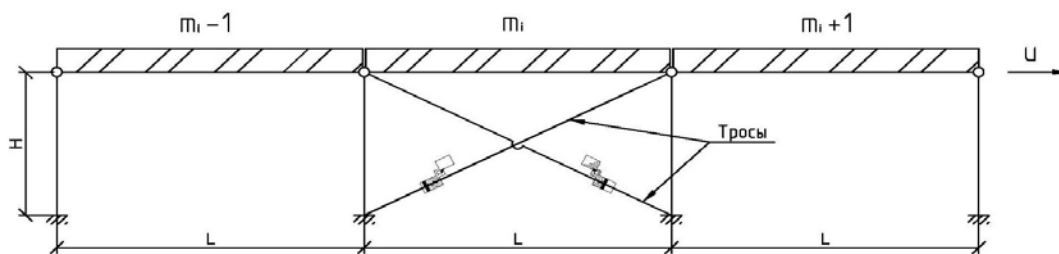


Рис. 2. Продольный разрез промышленного каркаса

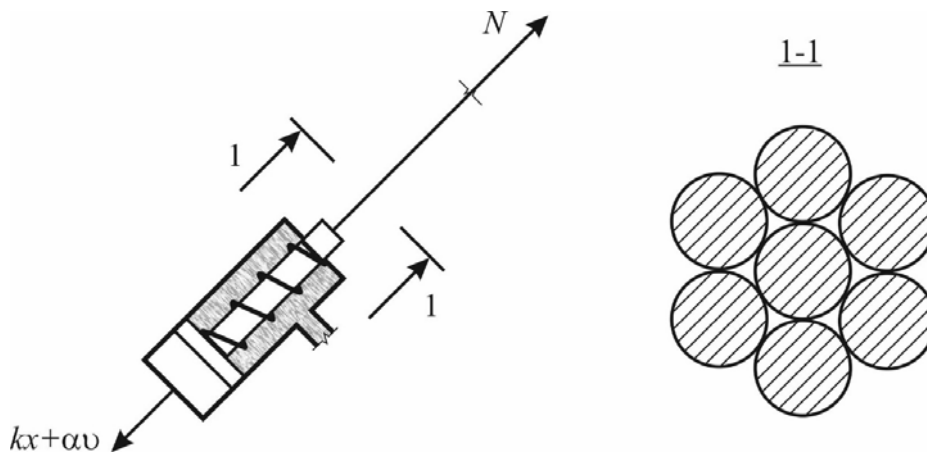


Рис. 3. К расчету гасителя. Гидроцилиндр и сечение троса

Для подбора параметров гидроцилиндра построена аппроксимирующая модель железобетонной рамной системы с перекрестными связями. Данную систему перекрестных связей можно представить простой моделью, показанной на рис. 4.

Будем полагать, что горизонтальная составляющая переносного ускорения, в силу большой длины и скорости волны, одновременно воздействует на все колонны каркаса. Горизонтальные перемещения узлов покрытия из-за значительной жесткости диска покрытия практически одинаковы. Поэтому расчетную схему каркаса на действие горизонтальных переносных воздействий можно представить одной, работающей из плоскости фермы колонной, эквивалентной ряду колонн жесткости с массой, равной массе диска покрытия с грузовой полосой, эквивалентной по ширине грузовой полосе для определения статической нагрузки на колонну.

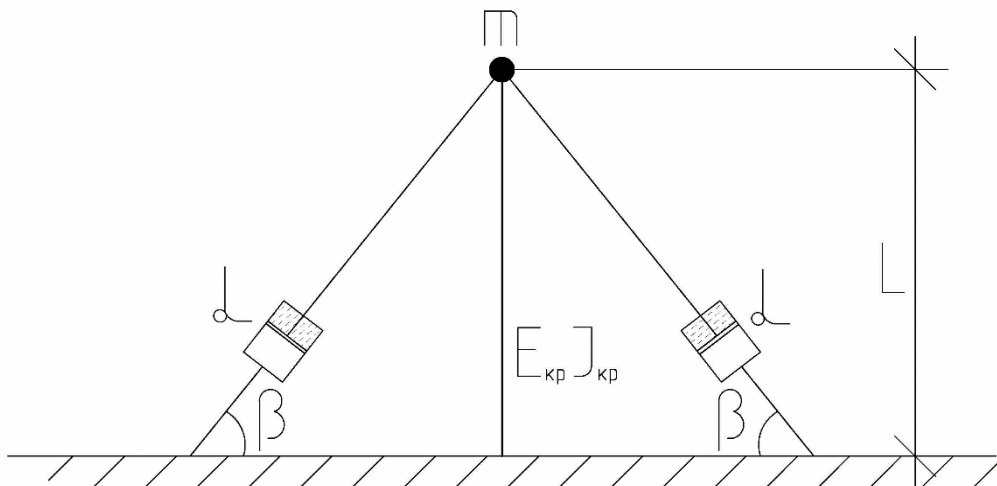


Рис. 4. Эквивалентная модель рамы с тросовыми связями

Сила сопротивления движению, возникающая в гидроцилиндре демпфера:

$$B_i \dot{U}_i = \alpha_i \begin{bmatrix} (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i & -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i \\ (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i & -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i \\ (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i & -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i \\ -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i & (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i \\ -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i & (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i \\ -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i & (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_{1,i} \\ \dot{u}_{2,i} \\ \dot{u}_{3,i} \\ \dot{u}_{4,i} \\ \dot{u}_{5,i} \\ \dot{u}_{6,i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где α_i – коэффициент сопротивления движению жидкости гидроцилиндра; c_j – косинус угла наклона троса к оси j ; $\dot{u}_{n,i}$ – скорость движения узла i в направлении n .

Введем обозначение:

$$C_i = \begin{bmatrix} (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i & -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i \\ (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i & -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i \\ (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i & -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i \\ -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i & (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i \\ -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i & (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i \\ -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i & (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где C_i – матрица преобразования наклонных усилий в тросе и пружине к глобальной системе координат. Тогда сила упругости в пружине гидроцилиндра

$$\hat{K}_i U_i = k_i C_i U_i, \quad (3)$$

где \hat{K}_i – матрица жесткости пружины; k_i – жесткость возвратной пружины; $U_i = [u_{1,i} \ u_{2,i} \ u_{3,i} \ u_{4,i} \ u_{5,i} \ u_{6,i}]^T$ – вектор линейных перемещений узлов крепления троса. А сила сопротивления движению демпфера

$$B_i \dot{U}_i = \alpha_i C_i \dot{U}_i. \quad (4)$$

Матрица жесткости шарнирно опертого стержня

$$k_i = \frac{EA_i}{l_i} \begin{bmatrix} (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i & -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i \\ (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i & -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i \\ (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i & -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i \\ -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i & (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i \\ -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i & (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i \\ -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i & (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где A_i – площадь сечения i -го троса.

Приведенная жесткость колонны из плоскости фермы может быть определена из соотношения

$$E_{\text{пр}} I = \sum_{i=1}^N E_{\text{пр},i} I_i, \quad (6)$$

где $E_{\text{пр}}$ – приведенные модули упругости железобетонных колонн ряда; I_i – моменты инерции этих колонн; N – количество колонн ряда.

Решение дифференциального уравнения движения демпфируемой системы позволяет определить максимальные горизонтальные перемещения диска покрытия и соответствующую данному коэффициенту сопротивления движению отклоняющую силу и проверить управляющую колонну на жесткость и срез. Расчет производился методом конечных элементов с использованием прямого метода решения системы дифференциальных уравнений движения – метода центральных разностей. Организуя цикл решений с измененными сопротивлением движению и/или параметрами колонн, можно подобрать оптимальные для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и параметры колонн для изгиба из плоскости.

Для проверки работы алгоритма проведена серия расчетов по акселерограмме землетрясения, произошедшего в 2001 г. близ острова Итуруп, оцененного в 8 баллов по шкале интенсивности землетрясения MSK-64. По результатам численных экспериментов показано, что тросовые связи с гидроцилиндрами одностороннего действия, работающие на положительных приращениях перемещений, дают хороший демпфирующий эффект. Кроме того, такие тросовые связи во многих случаях могут быть существенно надежнее жестких демпфирующих связей. Это касается вопроса выбора хода поршня, который надо запроектировать при превышении перемещений допустимых значений. После этого связи становятся жесткими на растяжение, и перекрестные связи работают как ограничители.

Сила, вызывающая горизонтальное перемещение управляющей колонны, может быть определена из соотношения

$$\delta_{11} F = u_{\text{max}}; \quad (7)$$

здесь δ_{11} , F и u_{max} – смещение от единичной силы, величина силы и максимальное перемещение.

При действии постоянных и временных длительных и кратковременных нагрузок прогиб железобетонных колонн не должен превышать 1/75 вылета консоли, т.е.

$$u_{\text{max}} \leq L/75, \quad (8)$$

где L – высота колонн.

Если это условие удовлетворяется, находим соответствующую поперечную силу в управляющей колонне:

$$Q_d = u_{\text{max}} / (\delta_{11} \times N). \quad (9)$$

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил для элементов постоянной высоты сечения, армированных хомутами, нормальными к оси элемента, выполним по наклонному сечению из условия

$$Q = Q_b + Q_{sw} , \quad (10)$$

где Q – поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции c от внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, при нагрузке, приложенной к боковой грани элемента; Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении; Q_{sw} – поперечная сила, воспринимаемая хомутами в наклонном сечении.

$$Q = (1.5R_{bt} \times b \times h^2)/c + 0.75R_{sw} \times A_{sw} \times c/S_w , \quad (11)$$

где параметр c подбирается в границах

$$h_0 \leq c \leq 2h_0$$

так, чтобы значение Q было минимальным. Здесь R_{bt}, b, h – прочность бетона и размеры сечения колонны; R_{sw}, A_{sw}, S_w – прочность, площадь сечения и шаг хомутов поперечной арматуры.

Если $Q_d > Q$, то увеличиваем сопротивление движению или сечение (армирование) колонн и повторяем расчет. Целесообразно одновременно выполнить проверку прогиба колонн из плоскости ферм.

Если $Q_d \leq Q$ и условие для границ выполняется – заканчиваем расчет. Параметры колонн и коэффициент сопротивления движению гидроцилиндров определены.

После снятия кинематического возмущения система аperiodически закончит движение:

$$u = e^{-nt} (u_0 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t} + (u'_0 + nu_0) e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t}). \quad (12)$$

Исходные данные для расчета:

Количество колонн $N = 6$. Сечение колонны – 0.4×0.4 м. Высота колонны $L = 6$ м. Арматура колонны: 4 стержня диаметром 25 мм (A500).

Шаг колонн – 6 м. Пролет фермы – 12 м. Класс бетона: B25 ($E_b = 3,0 \times 10^7$ кН/м², $R_{bt} = 1050$ кН/м²). Масса системы – 125000 кг. Максимальное перемещение $u_{\max} = 0,051$ м. Момент инерции $I = 0,0021333$ м⁴. Приведенный момент инерции $I_{red,общ} = 6 \times 0,0024083 = 0,01445$ м⁴. Приведенный модуль упругости железобетонной колонны $E_{np} = 3,2 \cdot 10^{10}$ Па. Расчетное сопротивление срезу $R_{bt} = 1050$ кН/м².

Хомуты: диаметр 8 мм, класс A240, шаг $S_w = 100$ мм, площадь двух ветвей $A_{sw} = 0,0001006$ м², сопротивление $R_{sw} = 170\,000$ кН/м². Рабочая высота сечения $h_0 = h - a = 0,4 - 0,05 = 0,35$ м. Коэффициент демпфирования $\alpha = 1,43 \cdot 10^6$ Па · с.

Приведенный модуль упругости железобетона для колонны сечением $0,4 \times 0,4$ м с арматурой $4\varnothing 25$ (A500) вычисляем по формуле

$$E_{np} = E_a \times \mu + E_b \times (1 - \mu); \quad (13)$$

здесь $E_a = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости арматуры; $E_b = 3,0 \cdot 10^{10}$ Па – модуль упругости бетона; $\mu = 0,01212$ – доля армирования сечения.

Получаем приведенный модуль $E_{np} = 3,206 \cdot 10^{10}$ Па.

Определяем приведенный момент инерции:

$$I_{red} = I + I_s \times a + I'_s \times a , \quad (14)$$

где I – момент инерции бетонного сечения; I_s, I'_s – моменты инерции площадей растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного сечения; a – коэффициент приведения,

$$a = \frac{E_s}{E_b}. \quad (15)$$

Следовательно, приведенный момент инерции $I_{red} = 0,01445 \text{ м}^4$.

Решение уравнения движения массы, приведенной на колонну,

$$m\ddot{U} + B\dot{U} + KU = -m\ddot{\Delta} \quad (16)$$

ищем прямым методом – методом Ньюмарка.

Максимальное значение перемещения

$$u_{max} \approx 0,05 \text{ м}.$$

Проверяем минимальную жесткость колонны. При действии постоянных и временных длительных и кратковременных нагрузок прогиб железобетонных колонн не должен превышать $1/75$ вылета консоли, т.е.

$$u_{max} \leq L/75, \quad (17)$$

где L – высота колонн.

$$0,05 \leq 0,08.$$

Условие жесткости выполняется.

Находим соответствующую поперечную силу в управляющей колонне:

$$Q_d = u_{max} / (\delta_{11} \times N), \quad \delta_{11} = \frac{L^3}{3 \times E_{np} \times I_{np}},$$

$$Q_d = \frac{3 \times U_{max} \times E_{np} \times I_{np}}{H^3} = 321,7 \text{ кН},$$

где параметр c подбирается в границах

$$0,35 \leq c \leq 0,7$$

так, чтобы значение Q было минимальным. Здесь R_{bt}, b, h – прочность бетона и размеры сечения колонны; R_{sw}, A_{sw}, S_w – прочность, площадь сечения и шаг хомутов поперечной арматуры.

$$Q_d = \frac{1,5 \times 1050 \times 0,4 \times 0,4^2}{0,35} + \frac{0,75 \times 170000 \times 0,0001006 \times 0,35}{0,1} = 332,89 \text{ кН},$$

$$Q_d = Q,$$

$$321,7 \text{ кН} \leq 332,89 \text{ кН},$$

Прочность на срез обеспечена.

Расчет каркаса в поперечном направлении. Похожим образом производим расчет колонны в плоскости балки (или фермы). Только колонна эквивалентной жесткости подсчитывается исходя из совокупности колонн поперечного направления (или работающих в плоскости балки). Тросовые, по сути также перекрестные, связи с

гидроцилиндрами 5, 6 устанавливаем к крайним колоннам поперечной плоской рамы (рис.5).

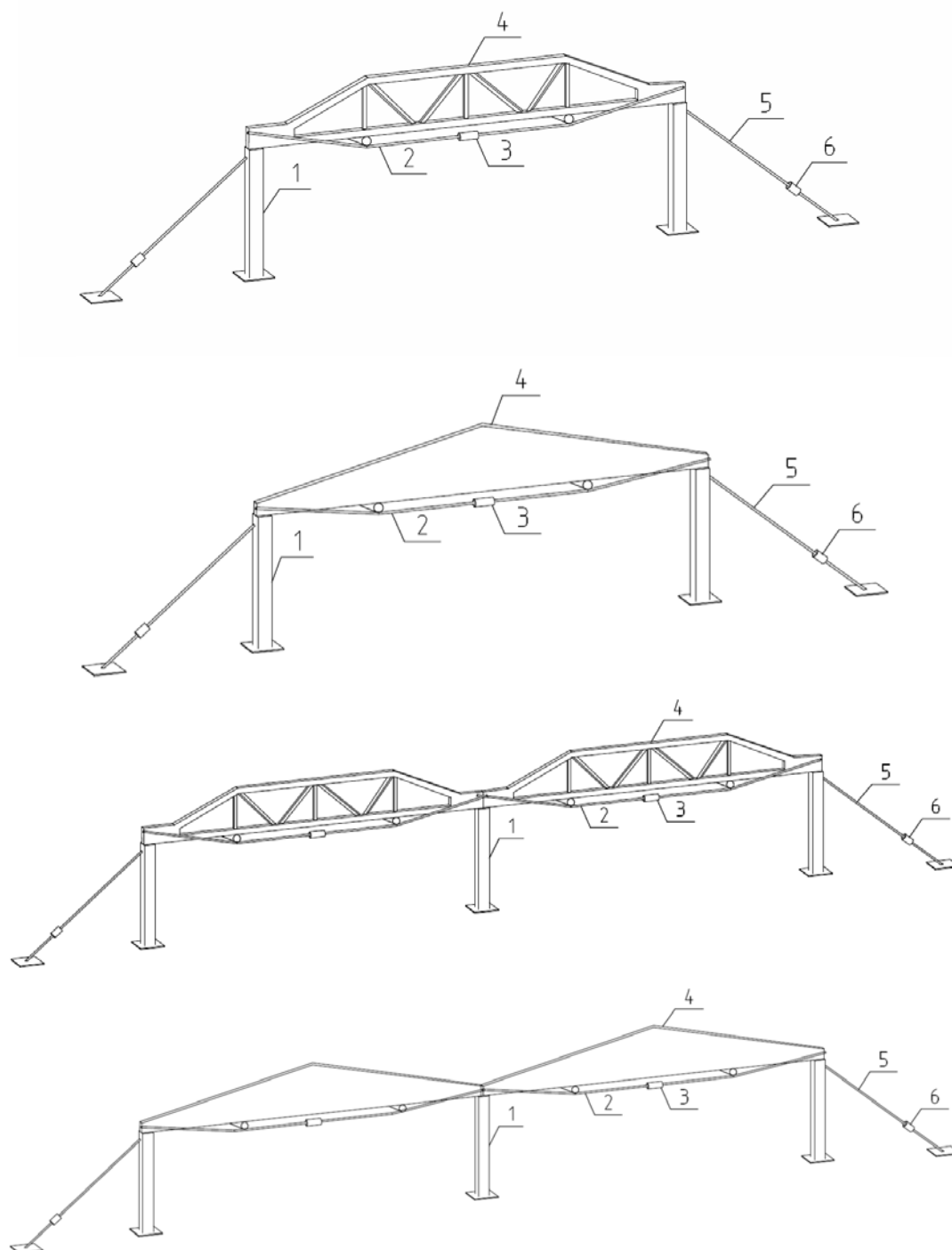


Рис. 5. Демпфирующие связи, устанавливаемые в поперечном и вертикальном направлениях:
1 – колонна; 2 – трос; 3 – демпфер; 4 – балка (ферма); 5 – трос; 6 – демпфер

А вертикальные связи с гидроцилиндрами расположены подобно затяжкам, как показано на рис. 5.

Расчет на вертикальную составляющую переносного движения. Балочная система испытывает значительные деформации и напряжения при возмущающих воздействиях от вертикальной составляющей акселерограммы переносного движения. Очевидно, что вертикальная составляющая оказывает влияние на каждую ферму (или

балку) в отдельности и защищать от вертикальных сейсмических воздействий нужно каждую ферму (или балку) в плоскости фермы. При этом можно использовать дополнительные тросовые связи, оборудованные гидроцилиндрами одностороннего действия. Расчет балок на вертикальную составляющую переносных ускорений производим с использованием расчетной схемы, представленной на рис.6.

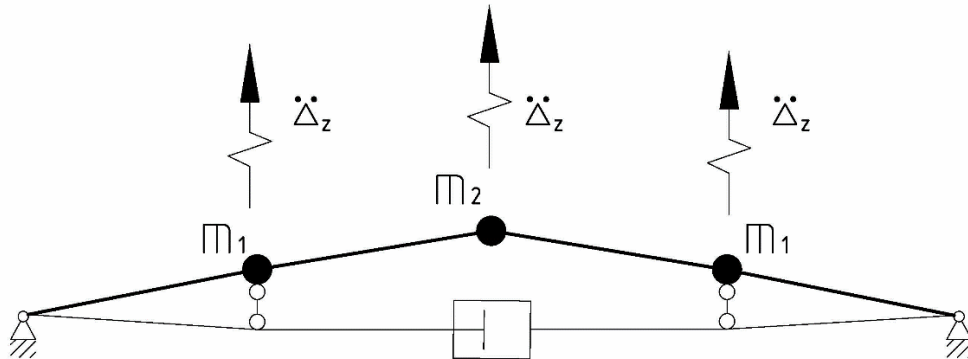


Рис. 6. Расчетная схема вертикального демпфирования балки

Что особенно важно: демпферы должны быть запроектированы так, чтобы они работали как связи с гидроцилиндрами до тех пор, пока перемещения не достигнут предельных значений. Этого добиваются длиной хода поршня. После этого тросовые связи жестко ограничивают перемещения, т.е. связи работают как ограничители.

Балка (или ферма), оборудованная тросовой системой с гидроцилиндром одностороннего действия, в зависимости от величины вертикального перемещения и направления движения контрольных узлов может находиться в одном из трех режимов работы (положительными считаются перемещения, направленные вверх от недеформированного состояния балки):

1. Движение вниз от положения статического равновесия при выполнении условий

$$\left. \begin{aligned} f_k &\leq f_{st}, \\ u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t}. \end{aligned} \right\}$$

В этом случае работают гидроцилиндры. Здесь f_k – вертикальное перемещение массы 1 (или 2); f_{st} – прогиб балки в положении статического равновесия.

2. Движение вверх (всегда) и движение вниз до положения статического равновесия, т.е. при

$$u_{k,t} > u_{k,t-\Delta t},$$

и/или

$$\left. \begin{aligned} u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t}, \\ u_{k,t} &> f_{st}. \end{aligned} \right\}$$

Тросовая система с гидроцилиндрами не работает.

3. Движение вниз ниже предельно допустимого положения

$$\left. \begin{aligned} u_{k,t} &\leq f_{st}, \\ u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t}, \\ u_{k,t} &\leq [u_k]. \end{aligned} \right\}$$

В этом случае тросовая система работает как ограничитель.

Таким образом, мы представили способ демпфирования колебаний на основе трех систем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти три отдельные системы демпфирования в сумме образуют интегральную систему снижения уровня колебаний пространственного железобетонного каркаса производственного здания.

Выводы.

1. Работоспособность и живучесть ленточно-тросовой системы связей с гидроцилиндрами одностороннего действия существенно выше обычной жесткой системы связей. Такая система связей позволяет полностью включить в работу собственные жесткости системы и в то же время предотвратить развитие колебаний механической системы.

2. Показан алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок в работу демпфируемой системы связи – каркас и снижения уровня колебаний каркаса.

3. Из цикла решений дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы с изменениями сопротивления движению и/или параметров колонн подбираются оптимальные для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и характеристики колонн и балок.

Список литературы

1. Агаханов, Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова. – DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-8-15 // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – №42 (3). – С.8–15.

2. Воробьева, К.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений / К.В. Воробьева, Х.Р. Зайнулабидова, М.В. Фрезе. – doi.org/10.21822/2073-6185-2016-40-1-108-118 // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – Т. 40, № 1.

3. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065.

4. Шеин, А.И. Уравнения движения системы «сооружение – перекрестные демпфирующие связи» при сейсмических возмущениях / А.И. Шеин, А.Н. Быков. – DOI 10.54734/20722958_2025_2_150 // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 150–158.

5. Денисов, Е.В. Динамический гаситель колебаний длинномерных конструкций балочного типа / Е.В. Денисов, С.А. Фоменко // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2014. – Вып. 8. – URL: [http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов %20Е. %20В. %20Динамический %20гаситель %20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов_%20Е.%20В.%20Динамический_%20гаситель_%20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

6. Катпин, А. Краткий обзор устройств гашения колебаний / А. Катпин, Мойзес // XX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии» / Томский политехнический университет. – Томск, 2015.

7. Froozanfar, Mohammad. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // Journal of Building Engineering. – 1 May 2024. – Vol. 84. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>

8. Yang, Kai. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // Structures. – August 2024. – Vol. 66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>

9. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // Procedia Engineering. –

2015. – Vol. 129, – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

10. Zoccolini, L. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art / L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettoruso, D. Rossi, V. Quaglini // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – Vol. 62. – URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784)

References

1. Agakhanov, E.K. Regulation of the Parameters of Natural Oscillations of the Spatial Frame of a Building / E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova. – DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-8-15 // *Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. – 2016. – №42 (3). – P. 8–15.

2. Vorobyeva, K.V. Accounting for Damping in the Problems of Estimating the Seismic Resistance of Buildings and Structures / K.V. Vorobyeva, Kh.R. Zaynulabidova, M.V. Freze. – doi.org/10.21822/2073-6185-2016-40-1-108-118 // *Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. – 2016. – Vol. 40, No. 1.

3. Shein, A. New vibration dampers for buildings and structures / A. Shein, A. Chumanov, A. Malkov, N. Laskov // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – Vol. 2503. – P. 050065.

4. Shein, A.I. Equations of motion of the «structure – cross-damping connections» system under seismic disturbances / A.I. Shein, A.N. Bykov. – DOI 10.54734/20722958_2025_2_150 // *Regional Architecture and Engineering*. – 2025. – No. 2 (63). – P. 150–158.

5. Denisov, E.V. Dynamic damper of vibrations of long-length structures of beam type / E.V. Denisov, S.A. Fomenko // *Mechanics. Scientific research and educational and methodological developments*. – 2014. – Iss. 8. – URL: http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов_20Е_20В_20Динамический_20гаситель_20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y

6. Katpin, A.A. brief overview of vibration damping devices / A. Katpin, Moises // *XX International Scientific and Practical Conference «Modern Engineering and Technologies»* / Tomsk Polytechnic University. – Tomsk, 2015.

7. Froozanfar, Mohammad. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // *Journal of Building Engineering*. – 1 May 2024. – Vol. 84. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>

8. Yang, Kai. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // *Structures*. – August 2024. – Vol. 66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>

9. Burtseva, O.A. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

10. Zoccolini, L. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art / L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettoruso, D. Rossi, V. Quaglini // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – Vol. 62. – URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784)

УДК 697.431

DOI 10.54734/20722958_2026_2_109

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Береговой Александр Маркович,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
научно-исследовательского сектора
E-mail: ambereg@rambler.ru

Присевка Александр Сергеевич,
аспирант
E-mail: techbeton@pguas.ru

Penza State University of Architecture and Construction
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Beregovoy Aleksandr Marcovich,
Doctor of Sciences, Professor, Chief
Researcher of the Research Sector
E-mail: ambereg@rambler.ru

Prisevka Aleksandr Sergeevich,
Postgraduate
E-mail: techbeton@pguas.ru

СТАДИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Береговой, А.С. Присевка

Исследованы факторы воздействия, приводящие к процессу теплотехнической деградации наружных ограждений зданий на стадиях переувлажнения, локального промерзания и засоления материала конструкции. Уточнены тепловые потери через однослойное наружное ограждение и его сопротивление теплопередаче на стадиях переувлажнения и промерзания стенового материала, а также накопления в нем минеральных солей и их кристаллогидратов. Дана оценка экономической эффективности термомодернизации наружных ограждающих конструкций в период, предшествующий наступлению отдельных стадий теплотехнической деградации. Приведен комплекс мероприятий по санации наружных ограждений, направленных на устранение отрицательного воздействия засоления материала конструкций на их теплотехнические и физико-механические свойства.

Ключевые слова: наружные ограждающие конструкции, теплотехническая деградация, промерзание ограждения, засоление ограждения, тепловые потери

STAGES OF THERMAL DEGRADATION OF EXTERNAL ENCLOSURE STRUCTURES AND WALL MATERIALS

A.M. Beregovoy, A.S. Prisevka

There has been investigated the factors, that lead to the process of thermal degradation of external enclosure structures at the stages of overwetting, local freezing, and salinization of the construction material. The heat losses through a single-layer exterior wall and its resistance to heat transfer have been specified at the stages of waterlogging and freezing of the wall material, as well as the accumulation of mineral salts and their hydrates. An assessment of the economic efficiency of timely thermal modernization of external enclosing structures has been given in the period preceding the onset of the mentioned stages of thermal degradation. A set of measures for their rehabilitation to eliminate the negative impact of salting of the material on the thermal and physical-mechanical properties of the structures.

Keywords: external enclosure structures, thermal degradation, freezing of the construction material, salting of the construction material, thermal losses

Одна из причин преждевременной потери теплотехнических и физико-механических свойств наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий состоит в отсутствии системного подхода, когда проектирование реализуется без должной оценки влияния эксплуатационных факторов, вызывающих сложные процессы сушки-

увлажнения материала, фазовых переходов влаги и накопления гигроскопических солей в его капиллярно-пористой структуре. Несвоевременная термическая модернизация наружных ограждающих конструкций интенсифицирует процесс теплотехнической и физико-механической деградации материалов, ускоряя переход здания в стадию ветхого или аварийного жилья.

Анализ исследований по теплотехнической деградации наружных ограждений показал, что основным ее механизмом являются прогрессирующее накопление влаги, циклы сушки-увлажнения и фазовых переходов влаги в капиллярно-пористой структуре материала, а также воздействие внешних неблагоприятных факторов. Все это приводит к появлению капельно-жидкой влаги в толще наружного ограждения, плесени и грибка на его внутренней поверхности, образованию конденсата, а также к локальному промораживанию стен, ухудшению санитарно-гигиенических условий в помещениях, ускоренному физическому износу конструкций и росту расходов на отопление.

Для предотвращения переувлажнения наружного ограждения и улучшения его конструктивного решения Куприяновым В.Н. введено новое понятие «температура начала конденсации» [1, 2]. В работе [3] рассмотрено развитие теории потенциала влажности с учетом различных механизмов протекания процессов влагообмена и влагопереноса в ограждающих конструкциях.

Под воздействием эксплуатационных факторов наружные ограждения и стеновые материалы проходят через отдельные стадии изменения теплотехнических качеств: нормальная работа (относительное постоянство теплотехнических показателей) → начало износа (влагонакопление и ухудшение теплотехнических свойств) → развитие деградации (локальное промерзание, вызывающее ступенчатый рост дефектов и тепловых потерь) → критическое состояние (активный рост деструктивных процессов в результате формирования скоплений солей и их кристаллогидратов, коррозия материалов и арматуры).

Изучение особенностей теплотехнической деградации наружных ограждающих конструкций проводилось на примере однослойных наружных стен. Однослойные кирпичные, керамзитобетонные и ячеистобетонные стены, уступающие более современным многослойным аналогам по теплозащитным показателям, имеют преимущества, обусловленные их способностью обеспечивать естественную воздухо- и паропроницаемость.

Перспективность однослойных конструкций стен в гражданском строительстве подтверждена результатами исследований по разработке модификаций теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных ячеистых бетонов, проведенных в ПГУАС [4]. Разработанные материалы обладают такими преимуществами, как малоэнергоёмкость изготовления (получение методом нормального твердения), экономичность, пожаростойкость, экологичность, а также низкая теплопроводность, достаточные физико-механические свойства, которые для стадии начала износа показаны в таблице [5].

Экспериментальные значения показателей ячеистых бетонов

Вид материала	Средняя плотность ρ_m , кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)
Пенобетон на ГЦПВ	300	0,6±0,15	0,070±0,002
Газобетон	300	0,9±0,10	0,075±0,002
Пеноарболит	300	0,7±0,13	0,063±0,002
	500	1,7±0,20	0,092±0,002
Пенокерамобетон	200	0,6±0,10	0,053±0,003
	400	1,1±0,15	0,085±0,003

На начальной стадии эксплуатации влажностный режим наружного ограждения нормируется показателем сопротивления паропрооницанию R_n , $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, который должен превышать следующие пороговые значения:

- величину R_{n1} , исходя из недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации;
- величину R_{n2} по требованию ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха.

В инженерных расчетах зависимость изменения теплопроводности материала наружного ограждения при увлажнении оценивается приблизительно, путем её упрощения до линейного вида:

$$\lambda_v = \lambda_c + \alpha W, \quad (1)$$

где α – постоянная, характеризующая увеличение теплопроводности материала при его увлажнении (W) на 1 %. Недостатком расчетов по зависимости (1) является вариация величины (α) в широком диапазоне (0,006...0,016), влияющая на точность результатов. Это приводит к необходимости уточнения зависимости (1) для вновь разрабатываемых материалов. Для расчета теплопроводности увлажненного пеноарболита на гипсоцементно-пуццолановом вяжущем (ГЦПВ) получено уравнение следующего вида [5]:

$$\lambda_{\text{ВПАБ}} = \frac{\lambda_{\text{ПАБ}} \cdot \lambda_{\text{ПВС}}^k}{\lambda_{\text{ПВС}}^k \left(1 - \sqrt[3]{V_{\text{возд}}}\right) + \lambda_{\text{ПАБ}} \sqrt[3]{V_{\text{возд}}}} V_{\text{возд}}^{\frac{2}{3}} + \lambda_{\text{ПАБ}} \left(1 - V_{\text{возд}}^{\frac{2}{3}}\right), \quad (2)$$

где $V_{\text{возд}}$ – относительный объем воздушных пор; $\lambda_{\text{ПВС}}^k$ – расчетный коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси в пустотах арболита; $\lambda_{\text{ПАБ}}$ – коэффициент теплопроводности материала межпоровых перегородок,

$$\lambda_{\text{ПАБ}} = \frac{0,78 \lambda_{\text{ввяж}} \lambda_{\text{зап}} \left(\sqrt[3]{1,27 V_{\text{зап}}}\right)^2}{\lambda_{\text{зап}} \left(1 - \sqrt[3]{1,27 V_{\text{зап}}}\right) + \lambda_{\text{ввяж}} \sqrt[3]{1,27 V_{\text{зап}}}} + \lambda_{\text{ввяж}} \left(1 - 0,78 \left(\sqrt[3]{1,27 V_{\text{зап}}}\right)^2\right); \quad (3)$$

здесь $V_{\text{зап}}$ – объемное содержание растительного заполнителя; $\lambda_{\text{зап}}$ и $\lambda_{\text{ввяж}}$ – коэффициенты теплопроводности растительного заполнителя и ГЦПВ- камня.

Экспериментальными исследованиями подтверждено значительное влияние влагосодержания ячеистого материала на его теплопроводность. Это указывает на необходимость принятия конструктивных мер по предотвращению накопления избыточной влаги, вызывающей ускорение деструкции теплотехнических показателей стеновых материалов.

К переувлажнению материала конструкции приводят отдельные факторы или их сочетания, связанные с ошибками проектирования, строительства или эксплуатации наружных ограждений. Среди них можно выделить нерациональное расположение конструктивных слоев, отсутствие гидроизоляционной и гидрофобной защиты от грунтовых вод в условиях влажного и мокрого режимов эксплуатации, дефекты системы водоотвода с крыши здания. При длительном периоде низких температур в наружном увлажненном слое ограждения влага кристаллизуется, в результате повышается теплопроводность и ускоряется промерзание материала по толщине конструкции.

Оценку роста тепловых потерь вследствие влагонакопления и промерзания проводили моделированием с использованием уравнений теплового баланса на границе промерзания конструкции и с учетом изменения коэффициента теплопроводности материала в мерзлой и влажной зонах [6]. Величину λ_3 оценивали по уравнению стационарной теплопередачи вида

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_v (t_v - t_3) \delta_3}{(t_3 - t_n) (\delta - \delta_3)}, \quad (4)$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности материала влажной зоны конструкции в стадии сверхсорбционного увлажнения; δ и δ_3 – общая толщина и глубина зоны промерзания стены соответственно; t_n , t_b и t_3 – температура соответственно наружной, внутренней среды и начала замерзания влаги в капиллярах материала.

Расчеты производились для конструкций однослойных стен жилых зданий, материал которых имел сверхсорбционное увлажнение в условиях температур внутреннего и наружного воздуха $+20$ и -25 °С. Полученные результаты показали, что при длительном воздействии низкой температуры с наружной стороны стен возникает зона промерзания, вызывающая рост тепловых потерь, величина которых зависит от материала конструкции:

- для пенобетона – на 25,3 % ($\rho_m=300$ кг/м³, $W=20$ %);
- для керамзитобетона – на 19,1 % ($\rho_m=1200$ кг/м³, $W=20$ %);
- для кирпичной кладки – на 8,3 % ($\rho_m=1700$ кг/м³, $W=15$ %).

В условиях агрессивных воздействий окружающей среды в материале наружного ограждения постепенно накапливаются деструктивные соединения – продукты жизнедеятельности микроорганизмов, кристаллогидраты и водорастворимые соли, диффузия которых приводит к появлению высолов. Исследования механизма протекания коррозии конструкций и защиты материалов в условиях агрессивной среды, выполненные в последнее время, позволили усовершенствовать методику оценки глубины и скорости протекания коррозии цементного камня в зависимости от количества наполнителя и особенностей кислотного воздействия [7], Обоснование эффективности применения ряда биоцидных защитных препаратов при воздействии агрессивной биологической среды на строительные материалы приведено в работах [8, 9].

Анализ химического состава продуктов засоления материала ограждающей конструкции показал, что его первоисточник – гидроксид кальция Ca(OH)_2 , вступающий в реакции с агрессивными агентами с образованием соответствующих хлоридов, сульфатов, карбонатов и бикарбонатов. Для определения условий конденсации водяного пара над засоленной поверхностью наружного ограждения изучали критическую величину относительной влажности воздуха $\varphi_{кр}$, которая определяется из условия равенства давлений пара над кристаллогидратом соли ($P_{крис}$) и в окружающем воздухе ($E_{возд}$):

$$\varphi_{кр} = P_{крис} / E_{возд}, \quad (5)$$

где $E_{возд}$ – максимальное давление пара при определенной температуре воздуха. По значению $E_{возд}$ вычисляется температура конденсации пара на поверхности засоленного слоя ограждения. Так, при температурах воздуха и поверхности ограждения 20 и 15 °С величина $\varphi_{кр}$ в присутствии кристаллогидрата $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ составит 78,6 %.

Расчетное моделирование позволило определить сопротивление теплопередаче R_0 наружной ограждающей конструкции (кладка из полнотелого керамического кирпича толщиной $\delta = 0,64$ м) и тепловые потери через нее (Q) с учетом следующих данных: глубина зоны промерзания конструкции найдена при температурах наружной и внутренней среды $t_n = -25$ °С и $t_b = 20$ °С, температура замерзания раствора соли в капиллярах материала $t_3 = -3,7$ °С, её содержание ограничено 7,1 %, а коэффициент теплопроводности материала влажной зоны конструкции при сверхсорбционном увлажнении составил: $\lambda_b = 0,94$ Вт/(м·°С).

В этих условиях величины R_0 , м²·°С/Вт, и Q , Вт, будут равны:

- с учетом промерзания конструкции – 0,75 и 60;
- с учетом промерзания конструкции в присутствии кристаллогидратов данной соли – 0,63 и 71,4.

Своевременное проведение комплекса мероприятий в рамках термомодернизации ограничено периодом эксплуатации здания, предшествующим второй и третьей стадиям теплотехнической деградации. Высокую эффективность показывают мероприятия, связанные с устройством вентилируемых фасадов, saniрующих штукатурок, пароизоляционных мембран и гидрофобных покрытий. Дополнительно производятся

работы по исключению попадания избыточной влаги в конструкцию ограждения от карниза, отмостки или фундаментов здания.

Оценка эффективности восстановления тепловой защиты наружных ограждений, проведенная на примере 3-подъездного 5-этажного дома, показывает, что за 10-летний период его эксплуатации после термомодернизации экономический эффект от выполненных работ может в 3-4 раза превысить капитальные затраты.

Ускоренная потеря теплотехнических и физико-механических свойств материала наружного ограждения при длительной эксплуатации здания наблюдается для конструктивных слоев небольшой плотности. Проведенные натурные обследования двухэтажных зданий, построенных в 50-годах прошлого столетия в г. Пензе, и расчетное моделирование показали, что из-за разрушения структуры насыпного шлакового утеплителя и пароизоляционного слоя на сборно-балочном деревянном перекрытии холодного чердака величина тепловых потерь через конструкцию более чем в 3 раза превосходит ту, которая определяется по стандартной методике, не учитывающей эксфильтрацию теплого воздуха.

При запоздалом проведении термомодернизации здания после долговременных агрессивных воздействий на наружные ограждения потребуются выполнение сложного комплекса мероприятий по их санации, связанных с устранением отрицательного воздействия влаги и солей на теплотехнические и физико-механические свойства этих конструкций.

В случае высокого скопления солей эффективным является использование противосолевых компрессов, а для удаления стойких высолов – химической очистки в сочетании с механическим воздействием для разрыхления массивов новообразований на поверхности конструкции.

Выводы:

1. Результаты моделирования и натурные обследования малоэтажных зданий показали, что в условиях прогрессирующего влагонакопления и локального промерзания наружных ограждающих конструкций создаются предпосылки для значительного роста тепловых потерь, обусловливаемых нарушением целостности утепляющего слоя.

2. По сравнению с требованиями норм сопротивление теплопередаче однослойного наружного ограждения может оказаться меньше, а тепловые потери через него больше в условиях промерзания конструкции в 1,12 раза, а при дополнительном воздействии такого неорганического химического соединения, как кристаллогидрат соли ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), – в 1,33 раза.

3. В процессе теплотехнической деградации при нарушении структурной целостности насыпного утеплителя и смежного пароизоляционного слоя из-за эксфильтрации теплого воздуха может наблюдаться существенное увеличение тепловых потерь через перекрытие холодного чердака по сравнению с проектными данными.

Список литературы

1. Куприянов, В.Н. Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях / В.Н. Куприянов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – №1 (59). – С. 29–40.

2. Куприянов, В.Н. Прогнозирование переувлажнения в ограждающих конструкциях при конденсации в них водяного пара / В.Н. Куприянов // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 2 (58). – С. 84–91.

3. Гагарин, В.Г. Развитие теории потенциала влажности для оценки состояния и переноса влаги в капиллярно-пористых материалах / В.Г. Гагарин // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы XXI МНК. – Волгоград, 2023. – С. 3–12.

4. Береговой, А.М. Энергоэффективные здания и их конструкции с учетом использования местных материалов : монография / А.М. Береговой, В.А. Береговой. – Пенза : ПГУАС, 2006. – 204 с.

5. Береговой, В.А. Эффективные пенокерамобетоны общестроительного и специального назначения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / Береговой Виталий Александрович. – Пенза, 2012. – 418 с.

6. Береговой, А.М. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №3. – С.99–104.

7. Селяев, В.П. Деградация цементных композитов под действием растворов карбоновых кислот / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшкина. А.А. Седова // Эксперт: теория и практика. – 2025. – С. 185–189.

8. Ерофеев, В.Т. Стойкость композитов из сухих строительных смесей при воздействии биологической среды / В.Т. Ерофеев, Е.Н. Абрамова, Т.Ф. Ельчищева [и др.] // Современные проблемы материаловедения : сборник научных трудов III Всероссийской НПК. – Липецк, 2022. – С. 15–24.

9. Ельчищева, Т.Ф. Биостойкость цементных композитов из сухих строительных смесей / Т.Ф. Ельчищева, В.Т. Ерофеев, П.В. Монастырев, Е.Н. Абрамова [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 5 (109). – С. 103–118.

References

1. Kupriyanov, V.N. Assessment and regulation of water vapor condensation in building envelopes / V.N. Kupriyanov // Izvestiya of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2022. – No. 1 (59). – P. 29–40.

2. Kupriyanov, V.N. Forecasting of Overmoisture in Building Constructions during Water Vapor Condensation / V.N. Kupriyanov // Privolzhsky Scientific Journal. – 2021. – No. 2 (58). – P. 84–91.

3. Gagarin, V.G. Development of the Theory of Humidity Potential for Assessing the State and Transfer of Moisture in Capillary-Porous Materials / V.G. Gagarin // Indoor Air and Environmental Quality. Materials of the XXI International Scientific Conference. – Volgograd, 2023. – P. 3–12.

4. Beregovoy, A.M. Energy-efficient buildings and their structures taking into account the use of local materials : A monograph / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy. – Penza : PGUAS, 2006. – 204 p.

5. Beregovoy, V.A. Effective foam-keramobetonov general construction and special purpose : dissertation for the degree of Doctor of Sciences : specialty 05.23.05 «Construction materials and products» / Beregovoy Vitaly Aleksandrovich. – Penza, 2012. – 418 p.

6. Beregovoy, A.M. Temperature and humidity state of external enclosure structures in conditions of phase transitions of moisture and aggressive environmental influences / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // Regional Architecture and Engineering. – 2017. – No.3. – P.99–104.

7. Selyaev, V.P. Degradation of cement composites under the influence of solutions of carboxylic acids / V.P. Selyaev, L.I. Kupriashkina. A.A. Sedova // Expert: Theory and Practice. – 2025. – P. 185–189.

8. Erofeev, V.T. Resistance of composites from dry construction mixtures under the influence of the biological environment / V.T. Erofeev., E.N. Abramova, T.F. Yelchishcheva [et al.] // Modern problems of materials science : collection of Scientific works of the III national scientific and practical conference. – Lipetsk, 2022. – P. 15–24.

9. Yelchishcheva T.F. Biostability of cement composites from dry construction mixtures / T.F. Yelchishcheva, V.T. Erofeev, P.V. Monastyrev, E.N. Abramova [et al.] // Construction and reconstruction. – 2023. – No. 5 (109). – P. 103–118.

УДК 725.4.05:534.2

DOI 10.54734/20722958_2026_2_115

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гречишкин Александр Викторович,
кандидат технических наук,
зав. кафедрой «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

*Научно-исследовательский институт
строительной физики РААСН*

Россия, 127238, г. Москва,
Локомотивный проезд, д. 21,
тел.: (495) 482-40-16

Антонов Александр Иванович,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
E-mail: aiant58@yandex.ru

*Тамбовский государственный технический
университет*

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,
тел.: (84752) 63-09-20;

Леденев Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Городское строительство
и автомобильные дороги»
E-mail: ledvi46@yandex.ru

Матвеева Ирина Владимировна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Городское строительство
и автомобильные дороги»
E-mail: times02@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grechishkin Aleksander Viktorovich,
Candidate of Sciences, Head of the
department «Urban Development and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Research Institute of Building Physics RAASN

Russia, 127238, Moscow,
21, Lokomotivnyj dr.,
tel.: (495) 482-40-16

Antonov Aleksander Ivanovich,
Doctor of Sciences, Leading Researcher
E-mail: aiant58@yandex.ru

Tambov State Technical University

Russia, 392000, Tambov, 106, Sovetskaya St.,
tel.: (84752) 63-09-20;

Ledenev Vladimir Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
department «Urban development and roads»
E-mail: ledvi46@yandex.ru

Matveeva Irina Vladimirovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Urban development and
roads»
E-mail: times02@yandex.ru

МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева

Улучшение санитарно-гигиенических условий работы персонала в производственных зданиях предусматривает установку в помещениях шумозащитных экранов и облицовок. Представлен инженерный метод расчета основных характеристик звукового поля в производственном помещении, позволяющий выполнять исследования шумового режима на рабочих местах до применения в помещении шумозащитных мероприятий. Метод дает возможность производить определение прямого и отраженного шума на ранних стадиях проектирования шумозащиты и на этой основе оценивать эффективность снижения шума акустическими экранами и звукопоглощающими облицовками.

Ключевые слова: производственные здания, акустические характеристики помещений, звуковое давление, отражение звука от ограждений, шумозащита

METHOD OF CALCULATING SOUND FIELD CHARACTERISTICS IN INDUSTRIAL BUILDINGS

A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva

Improving sanitary and hygienic working conditions of personnel in industrial buildings involves installing noise-protective screens and cladding in the premises. An engineering method for

calculating the main characteristics of the sound field in an industrial premises is presented, allowing the study noise regime in workplaces before applying noise protection measures in the premises. The method makes it possible to determine direct and reflected noise at the early stages of noise protection design and on this basis to evaluate the effectiveness of noise reduction by acoustic screens and sound-absorbing cladding.

Keywords: industrial buildings, acoustic characteristics of premises, sound pressure, sound reflection from fences, noise protection

Введение. Для снижения шума в производственных зданиях часто используется комбинированный метод шумозащиты, включающий в себя устройство шумозащитных экранов и звукопоглощающих облицовок [1]. Экран обеспечивает снижение на рабочем месте прямого звука, приходящего от источника, а звукопоглощающая облицовка уменьшает отраженный шум, образующийся в заэкранном пространстве. На стадии разработки таких мероприятий требуется оценка их акустической эффективности. Для этого выполняются сложные акустические расчеты с применением компьютерных технологий [2]. Эффективность снижения шума с помощью экрана зависит не только от снижения прямого звука, но и от наличия отраженной звуковой энергии в помещении [3-5]. Сведения о наличии и величине отраженной энергии на рабочем месте до установки экрана дают возможность получить предварительные данные о степени влияния отраженного шума на акустическую эффективность экрана и установить необходимость дополнительного устройства звукопоглощающей облицовки [6]. Для предварительной оценки отраженного звука следует использовать простые инженерные методы расчета. В статье рассматривается такой разработанный авторами инженерный метод расчета. При его разработке ставилась задача определения энергетических параметров звукового поля на рабочем месте до проведения шумозащитных мероприятий.

Принципы разработки метода. Плотность звуковой энергии в расчетной точке складывается из плотностей прямой $\varepsilon_{пр}$ и отраженной $\varepsilon_{отр}$ составляющих звукового поля. Расчет плотности прямой энергии, как правило, не вызывает затруднений. Плотность отраженной звуковой энергии зависит от геометрических параметров помещения и от его акустических характеристик [7]. В соразмерных помещениях при диффузном характере отражения звука от ограждений образуются звуковые поля, в которых отраженная энергия равномерно распределяется по объему [7, 8]. В то же время в несоразмерных помещениях наблюдается неравномерность распределения отраженной энергии. Неучет неравномерности может приводить к существенным ошибкам при определении отраженной звуковой энергии на рабочем месте и, как следствие, к снижению достоверности прогнозирования эффективности предполагаемых шумозащитных мероприятий с использованием экранов и звукопоглощающих облицовок.

В случае неравномерного распределения отраженной энергии суммарный уровень звукового давления в расчетной точке L_P будет определяться по формуле

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{\varepsilon_{пр} + \varepsilon_{отр} \cdot \gamma}{\varepsilon_0} \right) = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi R^2} + \frac{4(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S} \gamma \right), \quad (1)$$

где ε_0 – пороговое значение плотности звуковой энергии; L_w – уровень акустической мощности источника звука; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения ограждений; S – площадь ограждающих поверхностей помещения; R – расстояние между расчетной точкой и источником; γ – коэффициент неравномерности, учитывающий изменение плотности отраженной звуковой энергии в расчетной точке по отношению к средней ее величине в помещении $\varepsilon_{отр}$. Коэффициент γ может быть меньше или больше единицы.

Для более удобного практического использования выражение (1) можно записать в виде

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi R^2} (1 + \varphi) \right), \quad (2)$$

где φ – коэффициент, определяющий соотношение отраженной и прямой составляющих в расчетной точке,

$$\varphi = \frac{16\pi R^2 (1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha} S} \gamma. \quad (3)$$

Распределение отраженной звуковой энергии по объему зависит от пропорций помещений и от характера отражения звука от ограждений [9, 10]. Ниже приведена методика определения коэффициентов γ и φ в помещениях разных пропорций при разном характере отражения звука.

Для вычисления коэффициентов γ и φ в помещениях разных пропорций выполнены расчеты уровней в расчетной точке, располагаемой на рабочем месте на расстоянии 2.0 м от источника звука. Во всех вариантах расчетов точечный источник шума с акустической мощностью 110 дБ размещался в центре исследуемых помещений. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений во всех случаях принят равным $\alpha = 0,1$. Это характерно для большинства помещений без эффективных звукопоглощающих облицовок.

Так как характер отражения звука от ограждений существенно влияет на распределение отраженной звуковой энергии по помещению, расчеты выполнялись для двух вариантов отражения звука, наиболее характерных для производственных помещений, а именно для диффузной и зеркально-диффузной моделей отражения. В случае использования зеркально-диффузной модели доля рассеянной энергии принималась равной $\beta = 10\%$ от всей отраженной звуковой энергии. Такая величина β характерна для большинства производственных помещений.

Расчет уровней звукового давления в расчетных точках помещений при диффузном характере отражения звука от ограждений производился численным статистическим энергетическим методом, а при зеркально-диффузном отражении – комбинированным методом, при котором зеркально отраженная энергия определяется методом прослеживания лучей, а диффузно рассеянная энергия – численным статистическим энергетическим методом [2]. Расчеты выполнялись с использованием разработанной компьютерной программы, реализующей указанные методы расчета звуковых полей в помещениях.

Коэффициенты γ и φ определялись на основе рассчитанных значений суммарных уровней звукового давления L_p в расчетных точках по выражениям

$$\gamma = (10^{0,1(L_T - L_{np})} - 1) \frac{\alpha S}{16\pi R^2 (1 - \bar{\alpha})}, \quad (4)$$

$$\varphi = 10^{0,1(L_T - L_{np})} - 1. \quad (5)$$

Величина прямого звука L_{np} в выражениях (4) и (5) рассчитывалась как для точечного источника по формуле

$$L_{np} = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right). \quad (6)$$

При исследованиях использовалось условие, при котором основными факторами, влияющими на уровни звукового давления, являются пропорции помещений и площади их ограждающих конструкций. Пропорции, размеры и площади ограждения

помещений, в которых производился расчет уровней звукового давления L_p и определение значений коэффициентов γ и φ , представлены в табл.1.

Для помещений, приведенных в табл.1, расчеты уровней звукового давления выполнены для расчетной точки, расположенной на расстоянии $R = 2$ м от источника (табл. 2 и 3). Расчеты показали, что пропорции помещений незначительно влияют на уровни звука в необлицованных помещениях. Наибольшее изменение уровней составляет $L_{\max} - L_{\min} = 1.4$ дБ (табл. 3). В табл. 2 и 3 приведены средние уровни звуковой энергии L_{cp}^s в помещениях разных пропорций для определенных значений площади ограждений S . Эти значения близки к теоретическим значениям L_p , рассчитанным по выражению (1) при коэффициенте $\gamma = 1$.

Т а б л и ц а 1

Размеры помещений разных пропорций при фиксированной площади ограждений

Пропорции	Размеры помещений, м, при их общей площади ограждений S, m^2				
	200	500	1000	3000	6000
1:1:7	2.6:2.6:18.1	4.1:4.1:28.6	5.8:5.8:40.4	-	-
1:1:3,5	3.5:3.5:12.4	5.6:5.6:19.6	7.9:7.9:27.7	13.7:13.7:47.9	-
1:1:1	5.8:5.8:5.8	9.1:9.1:9.1	12.9:12.9:12.9	-	-
1:3.5:3.5	-	3.6:12.6:12.6	5.1:17.8:17.8	8.8:30.9:30.9	12.5:43.7:43.7
1:3.5:7	-	-	26.5:13.2:3.8	45.8:22.9:6.5	64.8:32.4:9.3
1:7:7	-	-	2.8:19.7:19.7	4.9:34.2:34.2	6.9:48.3:48.3

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета уровней L_p и коэффициентов γ и φ при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений

Пропорции	Результаты расчетов для помещений с площадью ограждений S, m^2				
	200	500	1000	3000	6000
Уровни звуковой энергии L_p					
1:1:7	103,0	99,8	98,1	-	-
1:1:3,5	102,1	99,5	97,6	95,0	-
1:1:1	-	99,0	97,2	-	-
1:3.5:3.5	-	99,3	97,4	95,4	94,5
1:3.5:7	-	-	97,6	95,8	95,0
1:7:7	-	-	98,1	95,9	95,4
$L_{\max}-L_{\min}$	0.9	0.8	0.9	0.9	0.2
L_{pcp}	102,6	99,4	97,7	95,5	94,5
Значения коэффициента γ					
1:1:7	0,998	1,050	1,241	-	-
1:1:3,5	0,790	0,961	1,046	0,977	-
1:1:1	0,790	0,827	0,905	-	-
1:3.5:3.5	-	0,906	0,974	1,231	1,381
1:3.5:7	-	-	1,046	1,510	1,954
1:7:7	-	-	1,241	1,584	2,463
Значения коэффициента φ					
1:1:7	9,03	3,80	2,25	-	-
1:1:3,5	7,15	3,48	1,89	0,59	-
1:1:1	7,15	2,99	1,64	-	-
1:3.5:3.5	-	3,28	1,76	0,74	0,42
1:3.5:7	-	-	1,89	0,91	0,59
1:7:7	-	-	2,25	0,96	0,66
φ_{cp}	7,78	3,39	1,95	0,80	0,56

Результаты расчета уровней L_p и коэффициентов γ и φ при диффузном отражении звука от ограждений

Пропорции	Результаты расчетов для помещений с площадью ограждений $S, \text{ м}^2$				
	200	500	1000	3000	6000
	Уровни звуковой энергии L_p				
1:1:7	103,1	100,0	98,0	-	-
1:1:3,5	102,5	99,2	97,0	95,0	-
1:1:1	-	98,9	96,6	-	-
1:3.5:3.5	-	99,1	97,3	94,9	94,1
1:3.5:7	-	-	96,9	95,0	94,4
1:7:7	-	-	98,0	95,6	94,3
$L_{\max}-L_{\min}$	0,6	1,1	1,4	0,6	0,2
	102,8	99,3	97,3	95,1	94,3
$L_{\text{ср}}$	103	99,6	97,5	95,0	94,1
	Значения коэффициента γ				
1:1:7	1,024	1,112	1,200	-	-
1:1:3,5	0,866	0,879	0,839	0,977	-
1:1:1	0,811	0,802	0,717	-	-
1:3.5:3.5	-	0,852	0,939	0,917	0,968
1:3.5:7	-	-	0,808	0,977	1,274
1:7:7	-	-	1,200	1,231	1,170
	Значения коэффициента φ				
1:1:7	9,26	4,03	2,17	-	-
1:1:3,5	7,84	3,18	1,52	0,59	-
1:1:1	7,34	2,90	1,30	-	-
1:3.5:3.5	-	3,09	1,70	0,55	0,29
1:3.5:7	-	-	1,46	0,59	0,38
1:7:7	-	-	2,17	0,83	0,35
$\varphi_{\text{ср}}$	8,15	3,30	1,72	0,64	0,34

Сравнение данных, приведенных в табл. 2 и 3, показывает, что более существенное влияние на степень неравномерности распределения отраженной звуковой энергии по помещению оказывает характер отражения звука. Наиболее значительно это влияние проявляется в несоразмерных длинных и плоских помещениях.

Из полученных расчетных значений коэффициента γ видно, что в соразмерных помещениях величина γ близка к 1,0 или чуть меньше нее. В несоразмерных помещениях значения коэффициента γ больше 1,0, что свидетельствует о большей неравномерности отраженного звукового поля в таких помещениях.

Анализ значений коэффициента φ показывает, что он зависит от площади ограждений помещений. При росте площади ограждений величина φ существенно снижается. При этом изменение пропорций помещений оказывают на нее менее существенное влияние. Графики изменений величин коэффициента φ в зависимости от пропорций помещений и площади ограждений приведены на рис. 1.

Основываясь на полученных результатах, для практических расчетов предлагаем использовать выражение (2) с коэффициентом φ .

Полученные расчетом значения коэффициента φ для помещений с различными пропорциями и размерами показаны на рис. 1. Видно, что на графиках с логарифмическими шкалами по осям абсцисс и ординат зависимость коэффициента φ от площади ограждений помещений S имеет почти линейный вид. Для средних значений коэффициента $\varphi_{\text{ср}}$ (см. табл. 2 и 3) получены аппроксимационные степенные

выражения, определяемые при зеркально-диффузном и диффузном отражениях соответственно по формулам

$$\varphi = 460 \cdot S^{-0,784}, \quad (7)$$

$$\varphi = 1077 \cdot S^{-0,928}. \quad (8)$$

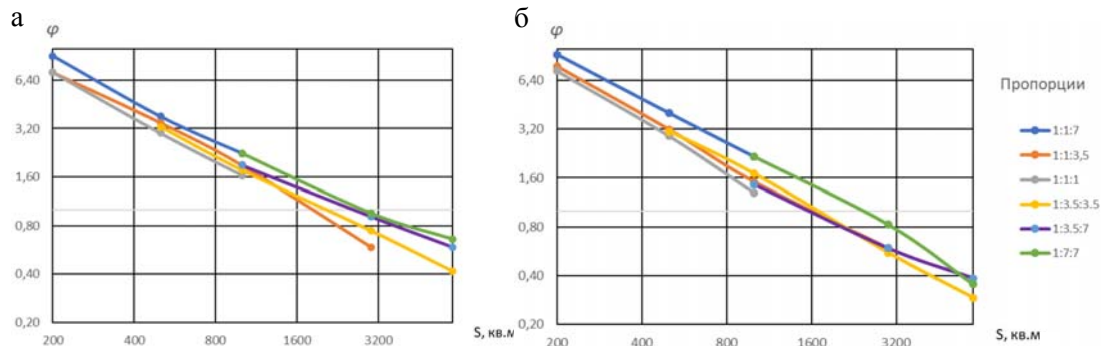


Рис. 1. Значения коэффициента φ при зеркально-диффузном (а) и диффузном (б) отражениях звука от ограждений

Соответствие полученных расчетных данных $\varphi_{\text{ср}}$ и значений аппроксимационных выражений φ показано на рис.2.

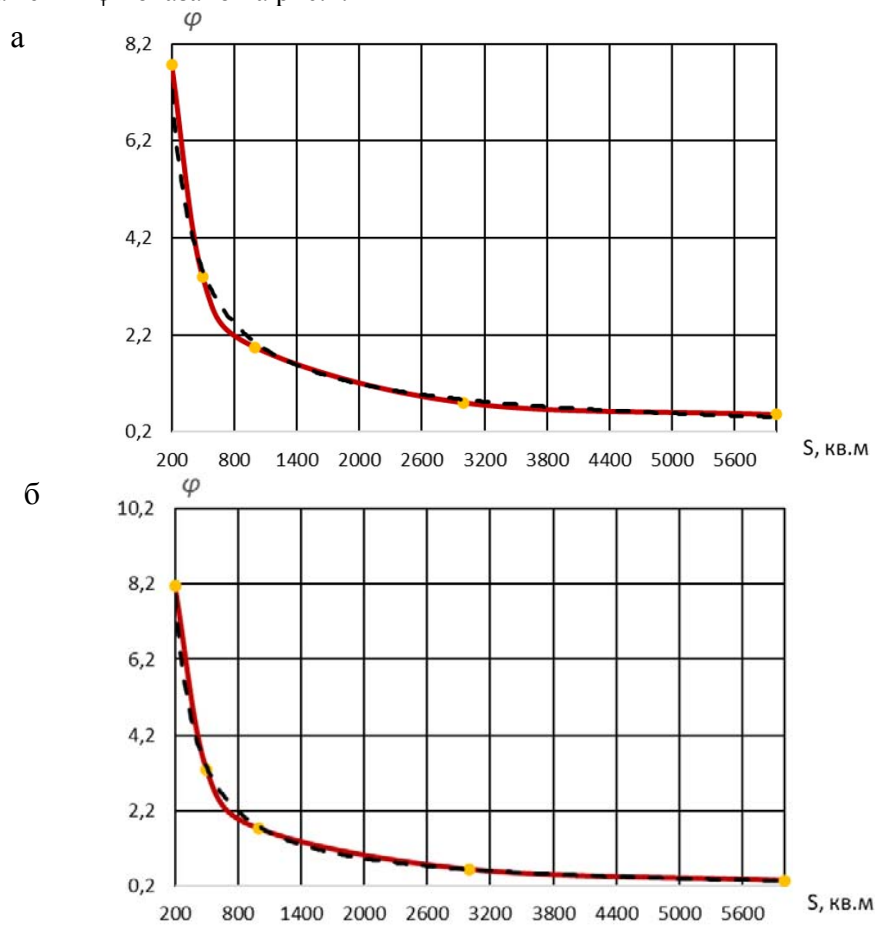


Рис. 2. Сравнение расчетных значений коэффициента φ со значениями выражения (7) при зеркально-диффузном отражении (а) и со значениями выражения (8) при диффузном отражении звука (б):

—●— — расчетные значения $\varphi_{\text{ср}}$; - - - значения φ по выражениям (7) и (8)

С учетом формул (7) и (8) выражения для суммарных (прямого + отраженного) уровней звукового давления в расчетной точке имеют следующий вид:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi R^2} (1 + 460 \cdot S^{-0,784}) \right], \quad (9)$$

$$L_p = L_w + 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi R^2} (1 + 1077 \cdot S^{-0,928}) \right]. \quad (10)$$

При разработке инженерных методов часто используется ограничение количества учитываемых факторов, влияющих на искомую величину. По этой причине во многих случаях удается получить достаточно простые выражения для расчета необходимых величин. Для расширения области применения инженерных методов с учетом дополнительных факторов в инженерные методики вводятся соответствующие поправки. В данном случае применительно к выражениям (9) и (10) основным фактором, который учитывался при их разработке, являлась площадь ограждающих конструкций. При этом использовалась расчетная ситуация, когда источник звука располагался в центре помещения. В случае перемещения источника ближе к стенам или углам помещения величина отраженного звукового поля может изменяться за счет ранних отражений звука от ограждающих конструкций на величину ΔL_n . С учетом этой поправки уровень звукового давления в расчетной точке будет составлять величину

$$L_0 = L_p + \Delta L_n, \quad (11)$$

где L_p – уровни звукового давления, определяемые по выражениям (9) и (10).

Согласно [11] максимальные значения поправок могут составлять: $\Delta L_n = 6$ дБ – при расположении источника вблизи угла помещения, $\Delta L_n = 3$ дБ – при расположении источника рядом со стеной. Следует иметь в виду, что фактические поправки в зависимости от расстояния источника от ограждающих поверхностей могут быть существенно меньше указанных выше величин. Конкретные значения поправок можно определить расчетом, например методом мнимых источников.

Общие выводы. Сравнение результатов, полученных с использованием формул (9) и (10), с данными точного метода расчета уровня звукового давления показало, что погрешность расчетов не превышает $\pm 1,5$ дБ для помещений правильной прямоугольной формы. Метод может использоваться для предварительной оценки шумового режима на рабочем месте помещения при выполнении проектирования шумозащиты в производственных зданиях.

Список литературы

1. Снижение шума акустическими экранами в помещениях с потолками из звукопоглощающих кулис кессонного типа / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, В.И. Леденев, И. В. Матвеева // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы международных академических чтений, Курск, 14 ноября 2025 года. – Курск : ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 12–17.
2. Компьютерное обеспечение расчетов шумовых полей в зданиях и сооружениях и на территориях городской застройки / А.И. Антонов, В.П. Гусев, В.И. Леденев [и др.] // Сборник трудов, посвященных памяти академиков РААСН В.М. Бондаренко и Г.Л. Осипова : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В.М. Бондаренко, и материалы Международной научной конференции, посвященной памяти академика РААСН Г.Л. Осипова. – Москва : Российская академия архитектуры и строительных наук, 2025. – С. 153–159.
3. Расчет эффективности акустических экранов, установленных в помещении / С.А. Кондратьев, Н.И. Иванов, Н.В. Тюрина, А.Е. Шашурин // Защита от шума и вибрации : сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с

международным участием, Санкт-Петербург, 01–03 октября 2025 года. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 246–252.

4. Vasiliev, F.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration at industrial enterprises of Russia / F.V. Vasiliev, V.A. Sannikov, N.V. Tyurina // *Akustika*. – 2019. – Vol. 32. – P. 247–250.

5. Бондаренко, В.А. Уточнение расчёта акустических экранов, устанавливаемых в производственном помещении / В.А. Бондаренко, И.В. Богуславский, С.С. Подуст. – DOI 10.12737/3508 // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2014. – Т. 14, № 1(76). – С. 93–97.

6. Кондратьев, С.А. Исследование акустических свойств помещений промышленных предприятий / С.А. Кондратьев, Н.В. Тюрина, К.П. Фиев // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – Т. 11, № 3(42). – С. 178–187.

7. Жоголева, О.А. Влияние планировочных и конструктивных решений на выбор методов расчета энергетических характеристик шума в гражданских зданиях как системах акустически связанных помещений / О.А. Жоголева, О.О. Федорова, С.А. Жоголев // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы 4-й Международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета*. – Тамбов : Издательство Першина Р.В., 2017. – С. 379–386.

8. Жоголева, О.А. Методика определения звукоизоляции ограждений квартир по условиям защиты от шума / О.А. Жоголева, Б.И. Гиясов, О.О. Федорова. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.10.1153-1162 // *Вестник МГСУ*. – 2017. – Т. 12, № 10(109). – С. 1153–1162.

9. Saviola, L. Overview of Geometrical Room Acoustic Modeling Techniques / L. Saviola, P. Svensson – doi.org/10.1121/1.4926438 // *JASA*. – 2015. – 138(2). – P. 708–730.

10. Kuttruff, H. Room acoustics / H. Kuttruff. – 4th ed. – London : Spon Press, 2000. – 349 p.

11. Борьба с шумом на производстве : справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн [и др.] ; под общ. ред. Е.Я. Юдина. – Москва : Машиностроение, 1985. – 400 с.

References

1. Noise reduction by acoustic screens in rooms with ceilings made of sound-absorbing curtains of the coffered type / A.I. Antonov, O.A. Zhogoleva, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva. Safety of the Construction Fund of Russia. Problems and solutions : Proceedings of the International Academic Readings, Kursk, November 14, 2025. – Kursk: ZAO Universitetskaya Kniga. 2025. – P. 12–17.

2. Computer support for calculations of noise fields in buildings and structures and in urban areas / A.I. Antonov, V.P. Gusev, V.I. Ledenev [et al.] // Collection of works dedicated to the memory of academicians of the Russian Academy of Natural Sciences V.M. Bondarenko and G.L. Osipov : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the Founding of the Russian Academy of Natural Sciences since the birth of Academician of the Russian Academy of Natural Sciences V.M. Bondarenko, and the Materials of the International Scientific Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Natural Sciences G.L. Osipov. – Moscow : Russian Academy of Architecture and Building Sciences. 2025. – P. 153–159.

3. Calculation of the effectiveness of acoustic screens installed indoors / S.A. Kondratiev, N.I. Ivanov, N.V. Tyurina, A.E. Shashurin // Protection from noise and vibration : Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, St. Petersburg, October 01-03, 2025. – Saint Petersburg : D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 2025. – P. 246–252.

4. Vasiliev, F.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration at industrial enterprises of Russia / F.V. Vasiliev, V.A. Sannikov, N.V. Tyurina // *Akustika*. – 2019. – Vol. 32. – P. 247–250.
5. Bondarenko, V.A. Refinement of the calculation of acoustic screens installed in the production room / V.A. Bondarenko, I.V. Boguslavsky, S. S. Podust. – DOI 10.12737/3508 // *Bulletin of the Don State Technical University*. – 2014. – Vol. 14, No. 1(76). – P. 93–97.
6. Kondratiev, S.A. Investigation of acoustic properties of industrial premises / S.A. Kondratiev, N.V. Tyurina, K.P. Fiev // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – Vol. 11, No. 3(42). – P. 178–187.
7. Zhogoleva, O.A. The influence of planning and design solutions on the choice of methods for calculating noise energy characteristics in civil buildings as systems of acoustically connected rooms / O.A. Zhogoleva, O.O. Fedorova, S.A. Zhogolev // *Sustainable development of the region: architecture, construction, transport : Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference of the Institute Architecture, Construction and Transport of Tambov State Technical University*. – Tambov: Pershina R.V. Publishing House, 2017. – P. 379–386.
8. Zhogoleva, O.A. Methodology for determining the sound insulation of apartment fences according to noise protection conditions / O.A. Zhogoleva, B. I. Giyasov, O.O. Fedorova. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.10.1153-1162 // *Bulletin of MGSU*. – 2017. – Vol. 12, № 10(109). – P. 1153–1162.
9. Saviola, L. Overview of Geometrical Room Acoustic Modeling Techniques / L. Saviola, P. Svensson. – doi.org/10.1121/1.4926438 // *JASA*. – 2015. – 138(2). – P. 708–730.
10. Kuttruff, H. *Room acoustics* / H. Kuttruff. – 4th ed. – London : Spon Press, 2000. – 349 p.
11. *Noise Control in Production : Handbook* / E.Ya. Yudin, L.A. Borisov, I.V. Gorenstein [et al.] ; Edited by E.Ya. Yudin. – Moscow : Mashinostroenie, 1985. – 400 p.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Корнюхин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail kornuhin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Kornyukhin Anatoly Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Building Structures»
E-mail: kornuhin@mail.ru

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин

Дается обзор ранее существовавших и действующего нормативных методов расчета элементов железобетонных конструкций по предельным состояниям второй группы по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента. Для уточнения оценки трещиностойкости железобетонных балок без поперечного армирования в зоне действия поперечных сил приводится расчетная зависимость, полученная на основе экспериментальных данных.

В качестве дополнительных факторов рассматриваются относительный пролет среза и процент продольного армирования для установления функциональной зависимости усилия образования наклонной трещины от геометрических и прочностных характеристик.

Ключевые слова: железобетонные балки, трещиностойкость, поперечная сила, наклонные трещины, усилие трещинообразования, оценка

EVALUATION OF CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE ZONE OF ACTION OF TRANSVERSE FORCES

O.V. Snezhkina, A.V. Kornyukhin

This article provides an overview of previously existing and current regulatory methods for calculating the second group limit states of reinforced concrete structural elements for crack formation inclined to the longitudinal axis of the element. To refine the assessment of the crack resistance of reinforced concrete beams without transverse reinforcement in the zone of action of shear forces, a calculation relationship derived from experimental data is presented.

The relative shear span and the percentage of longitudinal reinforcement are considered as additional factors to establish the functional relationship between the inclined crack formation force and geometric and strength characteristics.

Keywords: reinforced concrete beams, crack resistance, shear force, inclined cracks, crack formation force, assessment

Сопротивление конструкций в зоне действия поперечных сил относится к числу наиболее сложных и проблемных задач в теории расчета железобетона. Несмотря на многочисленные исследования, на современном этапе развития железобетона нет универсального метода расчета по образованию трещин, наклонных к продольной оси,

учитывающего особенности напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов [1...7].

На основе экспериментальных исследований был определен характер трещинообразования в зоне действия поперечных сил. Как правило, образование наклонных трещин в зоне действия поперечных сил происходит по двум схемам.

1. Вначале появляются нормальные трещины (в зоне действия максимальных изгибающих моментов), затем нормальные трещины распространяются в зону действия поперечных сил, меняя свою траекторию согласно действию главных сжимающих напряжений.

2. Наклонная трещина образуется в середине высоты сечения элемента в пределах пролета среза, развиваясь к верхней и нижней граням балки (в балках с большим значением относительного пролета среза наклонная трещина развивается стремительно; при малых значениях относительного пролета среза трещина развивается постепенно). Причем наклонная трещина второго типа может образовываться как после, так и до появления нормальных трещин [8-9].

В первом случае возникновение трещин может определяться расчетом по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента (п. 9.3 СП 63.13330.2018).

Методика расчета образования наклонных трещин второго типа (с учетом фактического напряженно-деформированного состояния) до настоящего времени пока не разработана.

В первой половине прошлого века расчет по образованию наклонной трещины в отечественных рекомендациях производился как для сплошного упругого тела: появление наклонных трещин оценивалось по расчетному сопротивлению бетона на осевое растяжение. При расчете на скалывание во избежание появления наклонных трещин ставились ограничения величины касательных напряжений из условия определения главных растягивающих напряжений:

$$\sigma_{\text{гл}} = \tau = Q/bz \leq R_p, \quad (1)$$

где z – плечо внутренней пары сил, $z = t \cdot h_0$. Табличное значение коэффициента t принималось в зависимости от прочности бетона и процента продольного армирования.

При развитии строительных норм критерий образования наклонной трещины стал описываться как комбинация главных сжимающих и растягивающих напряжений (либо соответствующих касательных и нормальных напряжений) при достижении ими критерия прочности бетона при плоском напряженном состоянии.

Впервые в отечественной нормативной литературе (СНиП II-V.1-62) описывается оценка предварительно напряженного элемента по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента. К середине семидесятых годов прошлого века (СНиП II-21-75) расчет по образованию наклонных трещин не ограничивается только предварительно напряженными железобетонными элементами. С учетом нарабатанных результатов экспериментально-теоретических исследований были внесены уточнения и дополнения. В частности, для оценки образования наклонных трещин используется критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии (в области «сжатие – растяжение»). В общем виде критерий прочности бетона выражается как некоторая функциональная связь между предельными значениями главных сжимающих и главных растягивающих напряжений, изменяющаяся от области осевого сжатия (где предельными напряжениями являются сопротивления бетона $R_{\text{пр}}$) до области осевого растяжения (где предельные напряжения характеризуются сопротивлениями бетона осевому растяжению R_p) приведенного сечения и в местах резкого изменения ширины сечения.

Расчет по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента, по СНиП 2.03.01.84 не имеет принципиальных отличий от расчета по СНиП II-21-75 и производится согласно условию

$$\sigma_{\text{mt}} \leq \gamma_{b4} R_{\text{bt,ser}}, \quad (2)$$

где величина главных растягивающих напряжений определяется по зависимости

$$\sigma_{m(mc)} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

Основной зависимости остаются формулы теории сопротивления материалов (где главные растягивающие напряжения определены на уровне нейтральной оси):

$$\sigma_{тр} = \tau = \frac{Q}{bz} = R_{bt} \quad (4)$$

и

$$Q = R_{bt}bz \quad (5)$$

или (приближенно)

$$Q = R_{bt}bh_0 \quad (6)$$

Однако эта зависимость существенно завышает фактические усилия образования наклонной трещины, особенно в области больших значений относительного пролета среза (рис. 1).

В действующих в настоящее время нормах проектирования (СП 63.13330.2018) расчет образования наклонных трещин не регламентирован.

Залесовым А.С., Ильиным О.Ф. для оценки усилия образования наклонной трещины в железобетонных балках по результатам экспериментальных исследований была предложена эмпирическая зависимость, состоящая из трех участков (см. рис. 1):

$$2R_{bt}bh_0 \geq Q = \frac{1,2R_{bt}bh_0^2}{a} \geq 0,6R_{bt}bh_0 \quad (7)$$

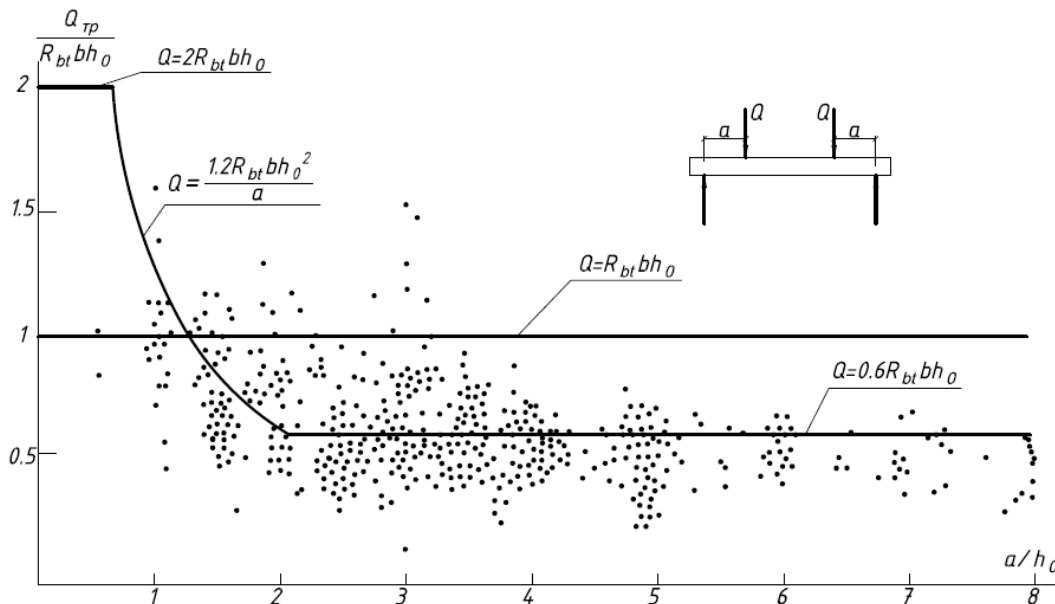


Рис. 1. Зависимость относительного усилия образования критической наклонной трещины от величины a/h_0 (НИИЖБ)

Анализ экспериментальных данных позволил выделить основные факторы, влияющие на трещиностойкость наклонных сечений: класс бетона; геометрические характеристики сечения; процент продольного армирования; наличие поперечной арматуры; относительный пролет среза (a/h_0). Однако не все факторы внесены в

расчетную зависимость (7). Так, увеличение процента продольного армирования в 2 раза (с $\mu_s=1,85\%$ до $\mu_s=3,7\%$) повышает трещиностойкость наклонного сечения: на 7 % при $a/h_0 = 1,5$; на 37 % при $a/h_0 = 3$; на 30 % при $a/h_0 = 6$. Увеличение относительного пролета среза с $a/h_0 = 1,5$ до $a/h_0 = 6$ понижает трещиностойкость наклонного сечения: на 30 % при $\mu_s=3,7\%$; на 40 % при $\mu_s=1,85\%$ (на основе экспериментальных исследований, проведенных Б.А. Шостаком, см. таблицу).

Для установления функциональной зависимости усилия образования наклонной трещины от геометрических и прочностных характеристик рассматривались две выборки образцов при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1,5 до 7 (в I серии процент продольного армирования $\mu_s=3,7\%$; во II серии $\mu_s=1,85\%$), разрушившихся в зоне действия поперечных сил (на основе экспериментальных исследований, проведенных Б.А. Шостаком, см. таблицу). Принципы работы многокритериальных систем подробно описаны в работах [10...12].

Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	a/h_0	μ_s	$Q_{cr}/R_b b h_0$	$\ln(a/h_0)$	$\ln(\mu_s)$	$\ln Q_{cr}/R_b b h_0$
1	1,5	3,7	1,05	0,4054651	1,3083328	0,0487902
2	3	3,7	0,86	1,0986123	1,3083328	-0,150823
3	4	3,7	0,76	1,3862944	1,3083328	-0,274437
4	5	3,7	0,77	1,6094379	1,3083328	-0,261365
5	6	3,7	0,74	1,7917595	1,3083328	-0,301105
6	7	3,7	0,75	1,9459101	1,3083328	-0,287682
7	1,5	1,85	0,98	0,4054651	0,6151856	-0,020203
8	3	1,85	0,63	1,0986123	0,6151856	-0,462035
9	4	1,85	0,57	1,3862944	0,6151856	-0,562119
10	5	1,85	0,61	1,6094379	0,6151856	-0,494296
11	6	1,85	0,57	1,7917595	0,6151856	-0,562119
12	7	1,85	0,57	1,9459101	0,6151856	-0,562119

По исходным данным (см. таблицу) с помощью программной надстройки «Пакет анализа», «Регрессия» (Microsoft Excel) получили линейную регрессию между $y = \ln Q_{cr} / R_b b h_0$ и $x_1 = \ln(a / h_0)$, $x_2 = \ln \mu_s$. Результаты регрессионной статистики представлены на рис. 2.

R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Вывод итогов								
<i>Регрессионная статистика</i>								
Множественный	0,967534763							
R-квадрат	0,936123517							
Нормированный	0,829735869							
Стандартная ошибка	0,105677335							
Наблюдения	12							
<i>Дисперсионный анализ</i>								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	2	1,636650209	0,818325105	73,27606954	2,69556E-06			
Остаток	10	0,111676992	0,011167699					
Итого	12	1,748327202						
<i>Коэффициенты стандартная ошибка статистики P-Значение Нижние 95% Верхние 95% Нижние 95,0% Верхние 95,0%</i>								
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X	-0,372813897	0,044102208	-8,45340662	7,24219E-06	-0,47107974	-0,274548054	-0,47107974	-0,274548054
Переменная X	0,212438093	0,063208001	3,360936744	0,007230908	0,07160189	0,353274297	0,07160189	0,353274297

Рис. 2. Результаты регрессионной статистики

Рассчитанные коэффициенты регрессии позволяют получить уравнение, выражающее зависимость относительного усилия образования наклонной трещины в железобетонных балках ($Q_{\text{срс}} / R_{bt}bh_0$) без поперечного армирования от относительного пролета среза a/h_0 и процента продольного армирования μ_s :

$$y = -0,37x_1 + 0,21x_2. \quad (8)$$

Значение множественного коэффициента детерминации $R^2=0,967$ показывает, что около 97 % общей вариации резульативного признака объясняется вариацией факторных признаков x_1, x_2 . Значит, выбранные факторы влияют на прочность балок по наклонному сечению, что подтверждает правильность их включения в построенную модель.

Рассчитанный уровень значимости $\alpha_p < 0,05$ подтверждает значимость R^2 .

Проверка значимости коэффициентов регрессии показывает, что абсолютные значения коэффициентов a_1, a_2 больше, чем их стандартные ошибки. К тому же эти коэффициенты являются значимыми, о чем можно судить по показателю P -значения (меньше заданного уровня значимости $\alpha=0,05$).

Таким образом, расчетная модель определения усилия образования наклонной трещины в железобетонных балках при разрушении по наклонному сечению отражает влияние исследуемых факторов x_1, x_2 на резульативный признак.

Преобразуем уравнение (1) в степенную функцию (для уточнения совместного влияния факторов h_0, a при расчете изгибаемых элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы):

$$\ln \left(\frac{Q_{\text{срс}}}{R_{bt}bh_0} \right) = -0,37 \ln \left(\frac{a}{h_0} \right) + 0,21 \ln \mu_s, \quad (9)$$

$$\frac{Q_{\text{срс}}}{R_{bt}bh_0} = \frac{\mu_s^{0,21}}{a/h_0^{0,37}} \quad (10)$$

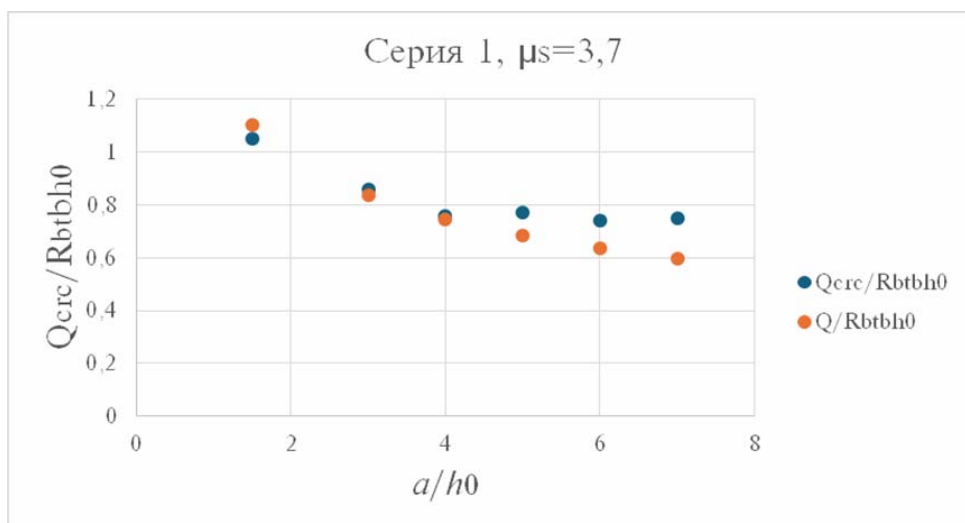
или

$$Q_{\text{срс}} = \frac{\mu_s^{0,2}}{a/h_0^{0,4}} R_{bt}bh_0. \quad (11)$$

Полученное выражение позволяет количественно определить влияние дополнительно введенных факторов ($a/h_0; \mu_s$) на трещиностойкость железобетонных балок без поперечного армирования в зоне действия поперечных сил.

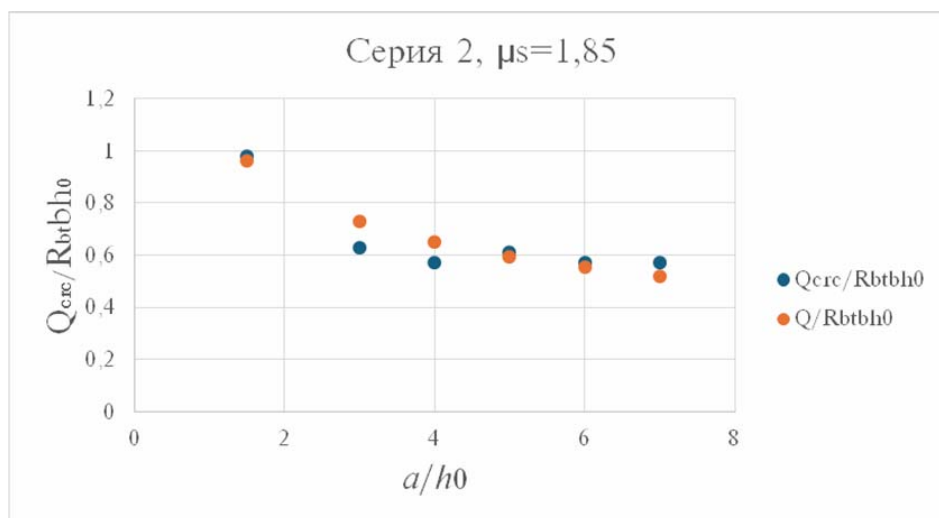
Экспериментальное подтверждение совместного влияния увеличения относительного пролета среза балки (от 1,5 до 7) на усилие образования наклонной трещины при изменении μ_s (1,85 %; 3,7 %) приведено на рис. 3.

а



Q_{crc} – опытное значение усилия образования наклонной трещины
 Q – расчетное значение усилия образования наклонной трещины

б



Q_{crc} – опытное значение усилия образования наклонной трещины
 Q – расчетное значение усилия образования наклонной трещины

Рис. 3. Зависимость относительного усилия образования наклонной трещины от величины относительного пролета среза:
 а – при $\mu_s=3,7$ %; б – при $\mu_s=1,85$ %

В ы в о д ы

1. Получено аналитическое выражение для определения усилия образования наклонной трещины в железобетонных балках без поперечного армирования по результатам экспериментальных исследований при влиянии: процента продольного армирования, относительного пролета среза, прочности бетона на осевое растяжение и геометрических характеристик сечения.

2. На основе корреляционного анализа установлена связь между результативным признаком (трещиностойкость) и исследуемыми факторами (процент продольного армирования, относительный пролет среза). Уровень всех выявленных связей различен и состоит в следующем: связь трещиностойкость балки – процент продольного армирования является прямой и средней ($r_{xy}=0,5$); связь трещиностойкость балки – пролет среза является обратной и сильной ($r_{xy}=-0,7$).

3. Установлено:

- увеличение процента продольного армирования в 2 раза (с $\mu_s=1,85\%$ до $\mu_s=3,7\%$) повышает трещиностойкость наклонного сечения: на 7 % при $a/h_0=1,5$; на 37 % при $a/h_0=3$; на 30 % при $a/h_0=6$;
- увеличение относительного пролета среза с $a/h_0=1,5$ до $a/h_0=6$ понижает трещиностойкость наклонного сечения: на 30 % при $\mu_s=3,7\%$; на 40 % при $\mu_s=1,85\%$.

Список литературы

1. Старишко, И.Н. Совершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям / И.Н. Старишко // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №5. – С.31–34.
2. Крылов, С.Б. Модель прочности наклонных сечений балок произвольной формы / С.Б. Крылов, В.И. Травуш, А.С. Крылов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – №4(27). – С. 46–64.
3. Краснощеков, Ю.В. О поперечной силе, воспринимаемой бетоном в наклонном сечении железобетонных элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СибАДИ. – 2018. – Т. 15, №3. – С.434–444.
4. Краснощеков, Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов / Ю.В. Краснощеков // Вестник СИБАДИ. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 182–192.
5. Филатов, В.Б. Результаты экспериментального исследования сопротивления железобетонных балок в зоне поперечного изгиба / В.Б. Филатов, В.О. Горынцев, В.П. Биндер // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, №4. – С. 25–31.
6. Снежкина, О.В. Трещиностойкость железобетонных балок с малым и средним пролетом среза / О.В. Снежкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 123–129.
7. Снежкина, О.В. Трещиностойкость железобетонных балок в зоне действия поперечных сил / О.В. Снежкина, И.И. Овчинников // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4 (65). – С. 137–144.
8. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, Ю.П. Гуца [и др.] ; под ред. А.А. Гвоздева. – Москва : Стройиздат, 1978. – 204 с.
9. Залесов, А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – Киев : Будивельник, 1989.
10. Гарькина, И.А., Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.
11. Данилов, А.М. Единая концепция системного проектирования сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
12. Данилов, А.М. Системы и модели: имитационное моделирование сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Информатика и системы управления. – 2024. – № 21 (80). – С. 18–31.

References

1. Starishko, I.N. Improving the calculation methodology for flexible reinforced concrete elements along inclined sections / I.N. Starishko // Industrial and civil engineering. – 2019. – No. 5. – P. 31–34.
2. Krylov, S.B. Strength model for inclined sections of beams of arbitrary shape / S.B. Krylov, V.I. Travush, A.S. Krylov // Bulletin of the Scientific Research Center «Construction». – 2020. – No. 4 (27). – P. 46–64.

3. Krasnoshchekov, Yu.V. On the transverse force perceived by concrete in an inclined section of reinforced concrete elements / Yu.V. Krasnoshchekov // Bulletin of SibADI. – 2018. – Vol. 15, No. 3. – P. 434–444.
4. Krasnoshchekov, Yu.V. Calculation model of resistance to transverse force of reinforced concrete bending elements / Yu.V. Krasnoshchekov // Bulletin of SIBADI. – 2019. – Vol. 16, No. 2. – P. 182–192.
5. Filatov, V.B. Results of an experimental study of the resistance of reinforced concrete beams in the zone of transverse bending / V.B. Filatov, V.O. Goryntsev, V.P. Binder // Urban development and architecture. – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 25–31.
6. Snezhkina, O.V. Crack resistance of reinforced concrete beams with small and medium shear spans / O.V. Snezhkina // Regional architecture and engineering. – 2021. – No. 3(48). – P. 123–129.
7. Snezhkina, O.V. Crack resistance of reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces / O.V. Snezhkina, I.I. Ovchinnikov // Regional architecture and engineering. – 2025. – No. 4 (65). – P. 137–144.
8. New in the Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures / A.A. Gvozdev, S.A. Dmitriev, Yu.P. Gushcha [et al.] ; Ed. by A. A. Gvozdev. – Moscow : Stroyizdat, 1978. – 204 p.
9. Zalesov, A.S. Strength of Reinforced Concrete Structures under the Action of Transverse Forces / A.S. Zalesov, Yu.A. Klimov. – Kyiv : Budivelnik, 1989.
10. Garkina, I.A. Design and Optimization of Properties of Complex Systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev// Regional Architecture and Engineering. – 2018.– No. 4 (37).– P. 5–11.
11. Danilov, A.M. Unified concept of system design of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 119–123.
12. Danilov, A.M. Systems and models: simulation modeling of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Computer science and control systems. – 2024. – No. 21 (80). – P. 18–31.

УДК 624.011.1

DOI 10.54734/20722958_2026_2_132

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Колесников Никита Викторович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Арискин Максим Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Мартышкин Даниил Олегович,
ассистент кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: historical95@mail.ru

Меркушов Антон Викторович,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»

E-mail: merkushov.av@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Kolesnikov Nikita Viktorovich,
Postgraduate of the department «Building
Structures»

E-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Ariskin Maksim Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the department «Building Structures»

E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Martyshkin Daniil Olegovich,
Assistant of the department «Building
Structures»

E-mail: historical95@mail.ru

Martyshkin Daniil Olegovich,
Assistant of the department «Building
Structures»

E-mail: historical95@mail.ru

УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СТОЕЧНО-БАЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ДЕРЕВЯННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ КРЕСТООБРАЗНЫХ ПЛАСТИНАХ

Н.В. Колесников, М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, А.В. Меркушов

Рассмотрено соединение стоечно-балочной системы с деревянными элементами с использованием клеенных стальных крестообразных пластин. На основе конечно-элементного моделирования в ANSYS описано конструирование и изготовление натурного образца. Проведено испытание первичного узлового соединения с контролем приложенной нагрузки и вертикальных перемещений. Получены и проанализированы результаты испытаний на изгиб до полного разрушения соединения при квазистатическом нагружении. Выявлены основные критерии разрушения.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, клеенные стальные пластины, крестообразная пластина, несущая способность, критерии разрушения

NODAL JOINTS OF A RACK-AND-BEAM SYSTEM WITH WOODEN ELEMENTS ON GLUED STEEL CRUCIFORM PLATES

N.V. Kolesnikov, M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, A.V. Merkushov

The connection of a rack-and-beam system with wooden elements using glued steel cruciform plates is considered. Based on finite element modeling, the design and manufacture of a full-scale sample is described and performed in ANSYS. The primary nodal connection has been tested with control of the applied load and vertical movements. The results of bending tests before the joint is completely destroyed under quasi-static loading are obtained and analyzed. The main criteria of destruction are revealed.

Keywords: wooden structures, joints, glued steel plates, cruciform plate, bearing capacity, fracture criteria

Введение. В строительной отрасли деревянные конструкции (ДК) приобретают большую актуальность благодаря своим экологическим преимуществам, высокой скорости возведения, легкости и удельной прочности. Однако эффективность таких конструкций во многом определяется надежностью узловых соединений, которые выступают критическими элементами, подверженными концентрации напряжений и деформаций под действием нагрузок. Традиционные методы соединения деревянных элементов – шиповые, зубчатые или болтовые – часто приводят к локальному ослаблению сечения, снижению жесткости и повышенному риску усталостного разрушения, особенно в условиях анизотропии древесины как материала.

В узловых соединениях ДК особое внимание уделяется использованию клеенных металлических элементов, в частности стальных пластин крестообразной конфигурации. Такие соединения обеспечивают монолитность и равномерное распределение усилий. Метод вклейки на основе эпоксидных композитов позволяет интегрировать сталь с древесиной без значительного нарушения целостности сечения [1, 3]. Численные модели, основанные на конечно-элементном анализе, демонстрируют потенциал таких систем в снижении пиковых напряжений, но требуют верификации экспериментальных данных для учета реальных факторов, таких, как неоднородность древесины, влияние влажности и технологические дефекты склейки [5-10].

Для подтверждения практической применимости узловых соединений стоечно-балочной системы с деревянными элементами на клеенных стальных крестообразных пластинах проведены первичные испытания натуральных образцов. Критические нагрузки получены на основе моделирования и расчета узла в программном комплексе ANSYS [2, 4].

Методика проведения испытаний. Конечно-элементное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Workbench. Деревянные элементы и клеенные стальные пластины моделировались объёмными конечными элементами SOLID186 с ортотропными свойствами древесины сосны 2-го сорта и изотропными свойствами стали С245. Контакт «древесина – клей – сталь» принят как bonded (моделирование жесткого клеевого соединения) [1]. Сетка конечно-элементной модели – 10 мм. Граничные условия: жёсткое защемление нижней грани стойки и торца одного из ригелей (рис. 1, 2). На основе результатов расчета соединения установлена расчётная разрушающая нагрузка $N_{\max}^{100} = 4,681$ кН при критерии разрушения – достижение предела прочности квадратного сечения бруса на действие изгибающей силы.

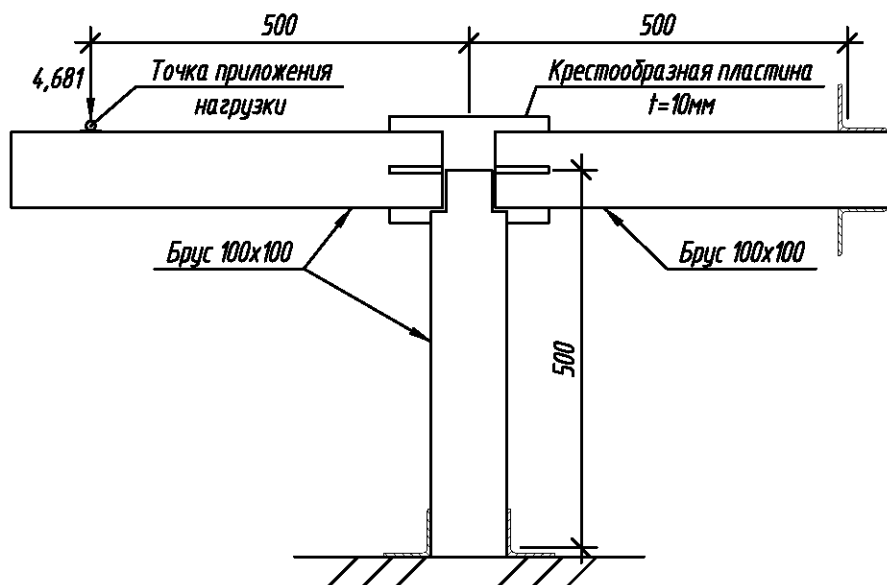


Рис. 1. Общая схема проведения испытания образца

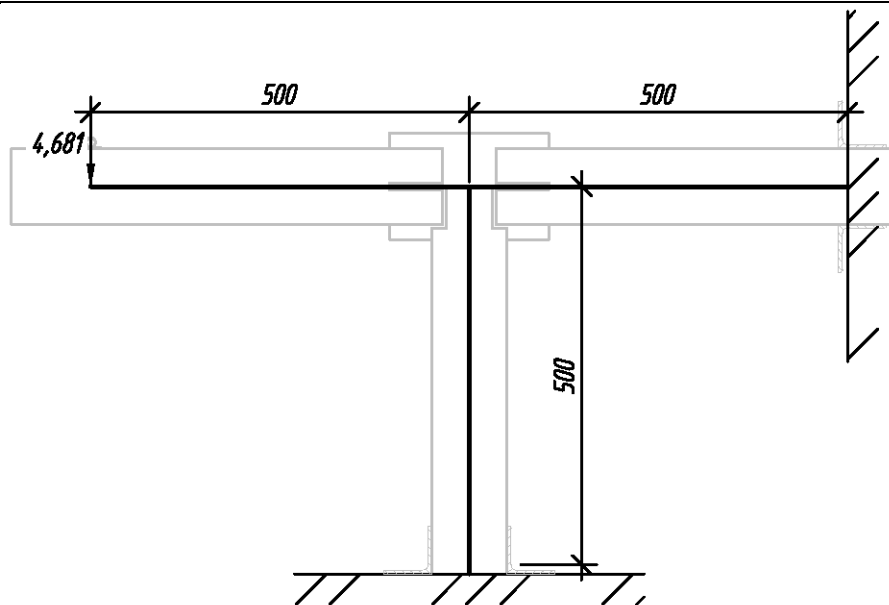


Рис. 2. Расчетная схема испытаний

На основе результатов конечно-элементного моделирования узлового соединения были выполнены первичные испытания образца.

Узловое соединение, аналогично расчетной схеме, представляет собой компоновку из трех деревянных брусков (стойка и два ригеля) длиной 500 мм каждый, с квадратным сечением 100×100 мм, выполненных из древесины сосны 2-го сорта (см. рис. 1, 2). В центральной зоне соединения вклеена крестообразная стальная пластина толщиной 10 мм из стали С245, симметрично расположенная относительно оси брусков. В торцах ригелей предусмотрены два перпендикулярных паза глубиной 70 мм и шириной 6 мм, выфрезерованные с помощью ЧПУ-станка для обеспечения точной посадки пластины. Аналогичный одиночный паз выполнен в торце стойки, с дополнительной подрезкой кромок для облегчения монтажа ригелей.

Фиксация пластины осуществлена с использованием эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем 45М в соотношении 2:1. Выдержка соединения после склейки составила не менее 48 часов для полной полимеризации смолы (рис. 3).

Испытание проводилось на силовой раме с гидравлическим домкратом ДУ20П150 грузоподъемностью 20 тс, устройством управления давлением 20 МПа ГТ 2.0.20, блоком электронно-преобразующим ГТ 6.0.31 (рис. 4, а).

Схема нагружения – консольный изгиб свободного ригеля вертикальной сосредоточенной силой, приложенной через стальной ролик диаметром 20 мм на расстоянии 500 мм от оси узла. Стойка и противоположный ригель, жёстко закрепленные в станине, имитируют условия защемления (рис. 5). Перемещения фиксировались датчиком линейных перемещений PZ-12-S-100 (рис. 4, б), установленным на конце консольного ригеля.

Испытание образца проводилось в два этапа:

- на первом этапе образец непрерывно нагружался до нагрузки в 1,25 кН (25 % от расчетной разрушающей нагрузки), со скоростью 0,1 кН/с с целью обкатки образца, выявления дефектов сборки (расслоения и полная полимеризация клея) и подтверждения упругой фазы деформации соединения. При достижении нагрузки в 1,25 кН вертикальное перемещение составило 3,25 мм, далее образец полностью разгружался для анализа остаточных деформаций (не превышали 0,1 мм) с целью подтверждения отсутствия пластических изменений;
- вторым этапом было нагружение соединения до теоретической расчетной максимально допустимой нагрузки в 4,6 кН, до полного разрушения испытываемого соединения. Нагрузка велась непрерывно со скоростью 0,25 кН/с.

а



б



Рис. 3. Общий вид деревянных элементов до склеивания (а).
Общий вид узлового соединения после сборки (б)

а



б



Рис. 4. Блок электронно-преобразующий ГТ 6.0.31 и устройство управления давлением ГТ 2.0.20 (а); датчик линейных перемещений PZ-12-S-100 (б)



Рис. 5. Общий вид узлового соединения в испытательном прессе

Результаты испытаний. По результатам натурных испытаний были получены графики зависимости вертикальных деформаций от приложенной нагрузки (рис. 6).



Рис. 6. Графики зависимости вертикальных перемещений от вертикальной нагрузки:
 а – при нагружении соединения до 1/4 расчетной разрушающей нагрузки;
 б – при нагружении соединения до полного разрушения

Специфика оборудования предполагает начальное тарирование образца под нагрузку, равную 1 кН, для устранения люфтов и калибровки, с последующим сбросом показаний, что отразилось на графиках в виде начального «пика».

Общий вид разрушения узлового соединения показан на рис. 7.



Рис. 7. Разрушение узлового соединения:

- а – общий вид разрушения (продольная трещина в середине сечения);
б – разрушение древесины ригеля в месте склейки со стальной пластиной

Разрушение образца произошло при нагрузке около 3,5 кН (вертикальные деформации – 7,5 мм), что составило около 85 % от прогнозируемой разрушающей нагрузки, полученной в ходе теоретического расчета.

Снижение фактической несущей способности относительно расчётной обусловлено следующими основными факторами:

- локальным ослаблением сечения ригеля пазами;
- наличием усушечных трещин в древесине;
- недостаточной адгезией эпоксидной композиции к поверхности пластины в отдельных зонах.

Характер разрушения – хрупкий отрыв древесины в зоне растянутых волокон над верхним горизонтальным пазом (рис. 7, б) с одновременным образованием продольной трещины по уровню паза из-за превышения предела прочности на скалывание вдоль волокон (рис. 7, а). Стальной крестообразный элемент, а также часть клевого шва остались без видимых повреждений.

Выводы

1. Разработана и описана методика конструирования узлового соединения стоечно-балочной системы, включающей деревянные элементы и вклеенные стальные

крестообразные пластины. Оптимизация параметров паза и клевого шва позволяет обеспечить жёсткость соединения, равную жёсткости монолитного бруса.

2. Проведены натурные испытания первичного образца до полного разрушения при консольном изгибе свободного ригеля. Полученные экспериментальным путем зависимости вертикальных перемещений от приложенной нагрузки позволяют количественно оценить деформативность соединения, подтвердить наличие выраженной упругой стадии работы, а также установить фактическую разрушающую нагрузку соединения (3,5 кН), что соответствует ~85 % от расчётной величины (4,6 кН), полученной в ходе теоретического расчета.

3. Определено наличие упругой стадии работы узлового соединения, проведен анализ полученных данных, сравнение результатов испытаний с теоретической моделью соединения, выявивший расхождение в 15 % по несущей способности, связанное с технологическими факторами (ослабление сечения и дефекты древесины).

Список литературы

1. Колесников, Н.В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов / Н.В. Колесников, М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, А.В. Меркушов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – № 2(41). – С. 69–78.

2. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Б. Муйземнек, А.С. Шадский. – 2-е изд., испр. – Москва : ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.

3. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.

4. Данилов, В.М. Возможности программного комплекса ansys для решения научно-практических задач в строительстве / В.М. Данилов, А.В. Ерофеев, Т.И. Горохов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (поиск). – Иваново : ИВГПУ, 2021. – № 1. – С. 182–185.

5. Арискин, М.В. Узловые соединения элементов стоечно-балочных систем на стальных пластинах / М.В. Арискин, Н.В. Колесников, Р.Т. Иксанов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сборник статей 81-й Всероссийской научно-технической конференции. – Самара : СамГТУ, 2024. – С. 134–144.

6. Вдовин, В.М. Клееметаллические соединения в несущих деревянных конструкциях / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, С.Ю. Кравцов // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – № 1. – С. 122–128.

7. Жаданов, В.И. К вопросу применения клеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций / В.И. Жаданов, И.В. Руднев, П.А. Дмитриев // Строительная наука – 2014: теория, образование, практика, инновации : сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Архангельск : Изд-во ООО «Типография «Точка», 2014. – С.309–314.

8. Лисицкий, И.И. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев, Д.А. Украинченко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – №5. – С. 31–43.

9. Жаданов, В.И. Клеенные плоские пластины в узлах сквозных деревянных конструкций / В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий, В.А. Пересыпкина // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием), Оренбург, 25–27 января 2021 года. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 135–140.

10. Жаданов, В.И. Оценка влияния различных факторов на несущую способность соединений клеенных стальных пластин с массивом древесины / В.И. Жаданов, В.С. Гарипов, И. И. Лисицкий // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 6(762). – С. 15–29.

References

1. Kolesnikov, N.V. Improving calculations of compounds of anisotropic structural materials / N.V. Kolesnikov, M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, A.V. Merkushev // *Bulletin of the Scientific Research Center «Construction»*. – 2024. – № 2(41). – P. 69–78.
2. Morozov, E.M. ANSYS in the Hands of an Engineer: Fracture Mechanics / E.M. Morozov, A.B. Muizemnek, A.S. Shadsky. – 2nd ed., rev. – Moscow : LENAND, 2010. – 456 p.
3. Rudnev, I.V. Connections of Elements of Wooden Structures Using Glued Steel Plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. – Novosibirsk, 2014. – No. 4. – P. 5–12.
4. Danilov, V.M. Capabilities of the ANSYS Software Package for Solving Scientific and Practical Problems in Construction / V.M. Danilov, A.V. Erofeev, T.I. Gorokhov // *Young Scientists – for the Development of the National Technological Initiative (Search)*. – Ivanovo : IVGPU, 2021. – No. 1. – P. 182–185.
5. Ariskin, M.V. Nodal Connections of Elements of Post-and-Beam Systems on Steel Plates / M.V. Ariskin, N.V. Kolesnikov, R.T. Iksanov // *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction and Construction Technologies : Collection of Articles from the 81st All-Russian Scientific and Technical Conference*. – Samara : SamSTU, 2024. – P. 134–144.
6. Vdovin, V.M. Glue-metal joints in load-bearing wooden structures / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, S.Yu. Kravtsov // *Regional architecture and engineering*. – 2007. – No. 1. – P. 122–128.
7. Zhadanov, V.I. On the issue of the use of glued metal plates in joints of wooden structures / V.I. Zhadanov, I.V. Rudnev, P.A. Dmitriev // *Construction Science-2014: theory, education, practice, innovations : proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. – Arkhangelsk : Publishing House of OOO Tipografiya Tochka, 2014. – P.309–314.
8. Lisitsky, I.I. Ways to increase the bearing capacity of joints of wooden structures on steel glued plates / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov, I.V. Rudnev, D.A. Ukrainchenko // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2018. – No. 5. – P. 31–43.
9. Zhadanov, V.I. Glued flat plates in nodes of through-through wooden structures / V.I. Zhadanov, I.I. Lisitsky, V.A. Peresypkina // *University complex as a regional center of education, science and culture : proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference (with international participation), Orenburg, January 25–27, 2021*. – Orenburg : Orenburg State University, 2021. – P. 135–140.
10. Zhadanov, V.I. Assessment of the influence of various factors on the bearing capacity of joints of glued steel plates with solid wood / V.I. Zhadanov, V.S. Garipov, I.I. Lisitsky // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2022. – № 6(762). – P. 15–29.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16:628.33

DOI 10.54734/20722958_2026_2_140

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Гришин Борис Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: bgrishin@rambler.ru

Бикунова Марина Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Салмин Сергей Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»
E-mail: sam14-08@mail.ru

Янюшкин Данила Александрович,
аспирант кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидротехника»

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Grishin Boris Mikhailovich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Water Supply, Sewerage and
Hydraulic Engineering»
E-mail: bgrishin@rambler.ru.

Bikunova Marina Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: mar-bikunova@yandex.ru

Salmin Sergey Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Water Supply, Sewerage
and Hydraulic Engineering»
E-mail: sam14-08@mail.ru

Yanyushkin Danila Aleksandrovich,
Postgraduate student of the Department
«Water supply, sewerage and hydraulic
engineering»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОКРУЖНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА В ВИХРЕВОМ НАПОРНОМ СМЕСИТЕЛЕ ВОДООЧИСТНОЙ СТАНЦИИ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, С.М. Салмин, Д.А. Янюшкин

Скорость диссипации энергии и градиент скорости – важнейшие характеристики эффективности работы смесительных устройств, используемых в технологиях физико-химической очистки природных и сточных вод. Основным параметром, определяющим величину диссипации энергии в вихревом напорном смесителе (ВНС), является окружная скорость в кольцевом пространстве ствола ВНС. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению окружной скорости потока воды в различных сечениях ствола ВНС высотой 1 м и внутренним диаметром 32 мм, с наличием центрального стержня и без него. Предложены математические зависимости для определения значений окружной скорости потока в стволе ВНС при различных соотношениях конструктивных элементов смесителя и расхода воды. Найдены оптимальные конструктивные и кинематические параметры работы ВНС, обеспечивающие наиболее эффективное использование энергии вращательного потока и высокие значения градиента скорости.

Ключевые слова: смешение воды с реагентами, вихревой напорный смеситель, скорость диссипации энергии, градиент скорости, окружная скорость потока, конструктивные параметры смесителя

DETERMINATION OF CIRCUMFERENTIAL FLOW VELOCITIES IN A VORTEX PRESSURE MIXER OF A WATER TREATMENT STATION

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, S.M. Salmin, D.A. Yanyushkin

The rate of energy dissipation and velocity gradient are the most important characteristics of the efficiency of mixing devices used in technologies for the physical and chemical treatment of natural and waste water. The main parameter determining the amount of energy dissipation in a vortex pressure mixer (VPM) is the circumferential velocity in the annular space of the VPM shaft. The article presents the results of experimental studies to determine the circumferential velocity of water flow in various sections of a VPM shaft with a height of 1 m and an internal diameter of 32 mm, with and without a central rod. Mathematical relationships are proposed for determining the circumferential flow velocity in the VPM shaft for various ratios of the mixer's structural elements and water flow rates. Optimal design and kinematic parameters for VPM operation are determined, ensuring the most efficient use of rotational flow energy and high velocity gradient values.

Keywords: mixing water with reagents, vortex pressure mixer, energy dissipation rate, velocity gradient, circumferential flow velocity, mixer design parameters

Процессы смешения воды с реагентами или воздухом в смесителях различных типов широко используются при физико-химической очистке природных и сточных вод [1-4]. Важнейшей характеристикой эффективности работы смесителей является градиент скорости G , определяемый из выражения [5-7]

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}}, \quad (1)$$

где ε – скорость диссипации кинетической энергии потока жидкости, $\text{м}^2/\text{с}^3$; ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для напорных смесителей скорость диссипации энергии может быть найдена по формуле [8]

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot \Delta p}{\rho \cdot V} = \frac{\Delta p}{\rho \cdot t}, \quad (2)$$

где Q – расход потока жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; Δp – потери давления в смесителе за счёт диссипации кинетической энергии потока, Па; ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время смешения жидкости с реагентами или воздухом, с.

Одними из наиболее совершенных смесительных устройств водоочистных станций, обеспечивающих оптимальные значения градиента скорости (300 с^{-1} и более), являются вихревые напорные смесители, которые отличаются конструктивной простотой и удобством в эксплуатации [9]. Схема вихревого напорного смесителя, применяемого при физико-химической очистке производственных сточных вод, показана на рис. 1.

Обрабатываемая вода с введённым в неё реагентом или воздухом поступает через тангенциально присоединённый патрубок 1 во входную камеру 2, где создаётся вращательное движение потока с увеличивающейся окружной скоростью по направлению ко входу в вихревую камеру (ствол) 3. За счёт расположенного соосно с вихревой камерой центрального стержня 4 в кольцевом пространстве 5 при вращении нисходящего спирального потока создаются высокие значения градиента скорости по всей высоте H ствола вихревого смесителя. После завершения процесса смешения обработанная вода отводится из смесителя через выходную камеру 6 с тангенциально присоединённым патрубок 7 на сооружения для водоочистки.

Потери давления Δp в формуле (2) являются функцией диссипации энергии потока в стволе ВНС. В произвольно взятом i -м сечении ствола диссипация энергии [10]

$$E_i = F \left(\lambda, R, Z_i, \xi, \frac{v_{ai}^2}{2} \right), \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; R – гидравлический радиус кольцевого сечения, м; Z_i – расстояние i -го сечения от входа в вихревую камеру, м; ξ – коэффициент местного сопротивления нисходящего спирального потока; v_{ai} – абсолютная скорость движения воды в кольцевом пространстве ствола, м/с,

$$v_{ai} = \sqrt{v_d^2 + v_{ri}^2}; \quad (4)$$

здесь v_d – продольная скорость движения потока воды в вихревой камере, м/с, $v_d = \text{const}$; v_{ri} – окружная скорость потока в i -м сечении, м/с.

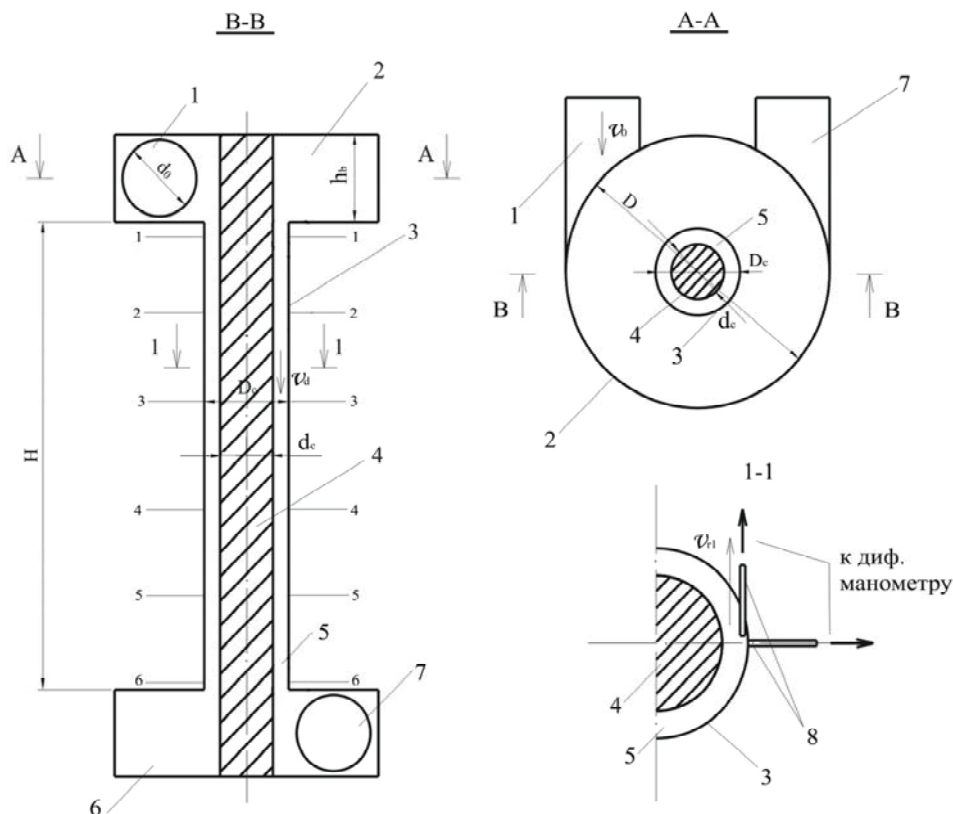


Рис. 1. Схема вихревого напорного смесителя:

- 1 – входной патрубок; 2 – входная камера; 3 – ствол (вихревая камера);
4 – центральный стержень; 5 – кольцевое пространство; 6 – выходная камера;
7 – выходной патрубок; 8 – трубки Пито – Прандтля

Основным параметром, определяющим величину диссипации энергии, является окружная скорость потока в кольцевом пространстве ствола ВНС; поэтому целью исследований являлось экспериментальное определение закономерностей изменения величины v_{ri} по длине (высоте) ствола в зависимости от конструктивных размеров смесителя при заданных значениях расхода обрабатываемой воды.

Экспериментальная установка состояла из расходного бака, насоса с напором до 50 м и модели исследуемого смесителя с высотой ствола $H=1,03$ м. Размеры конструктивных элементов модели ВНС были следующие (см. рис. 1):

- 1) внутренние диаметры d_0 входных и выходных патрубков, а также соответствующие им высоты камер h_b – 20, 25 и 32 мм;
- 2) внутренний диаметр ствола D_c – 32 мм;
- 3) диаметры центрального стержня d_c – 15, 20 и 25 мм;
- 4) внутренние диаметры входных и выходных камер D – 100, 150 и 200 мм.

Расход воды Q , подаваемый насосом из расходного бака в модель ВНС, замерялся объёмным способом с применением мерной ёмкости. Измерения окружной скорости потока воды v_{ri} ($i=1...6$) в кольцевом пространстве ствола ВНС производились в

сечениях 1-1...6-6, расположенных друг от друга на расстоянии 0,2 м (см. рис. 1) Полный и пьезометрический напоры потока в каждом сечении определялись с помощью трубок Пито – Прандтля, присоединённых к двухканальному цифровому дифманометру UNIT UT366А с точностью измерения в пределах 2,5 %.

В процессе исследований также вычислялись скорость v_0 во входном патрубке ВНС, а также скорость v_d в кольцевом пространстве вихревой камеры по формулам

$$v_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2}, \quad (5)$$

$$v_d = \frac{4Q}{\pi(D_c^2 - d_c^2)}. \quad (6)$$

Скорость потока v_0 во входном патрубке ВНС изменялась в пределах от 1,13 до 4,15 м/с, а продольная скорость v_d в кольцевом сечении ствола – от 0,73 до 6,3 м/с.

Экспериментальные исследования ВНС проводились в 2 этапа. На первом этапе определялись значения окружной скорости потока v_{r1} в сечении 1-1 на входе в ствол ВНС при различных расходах Q (скоростях v_0) и соотношениях D , D_c и d_c . Результаты экспериментов по определению величин v_{r1} приведены в таблице.

Значения окружной скорости v_{r1} , м/с, на входе в ствол ВНС при различных конструктивных и кинематических параметрах смесителя

Расход $Q \cdot 10^{-4}$, м ³ /с	Средняя скорость v_0 , м/с, во входном патрубке	Диаметр входной камеры D , мм											
		100				150				200			
		Диаметры внутреннего стержня d_c , мм											
		0	15	20	25	0	15	20	25	0	15	20	25
(5,9±2) %	(1,2±2) %	1,3	2,0	2,6	3,6	1,6	2,5	3,2	4,6	1,8	2,9	3,7	5,4
(9,8±2,5) %	(2,0±2,5) %	2,1	3,3	4,3	6,1	2,5	4,1	5,1	7,5	2,9	4,7	6,3	8,6
(14,7±2,7) %	(3,0±2,7) %	3,2	4,9	6,3	9,3	3,8	6,1	7,8	11,2	4,7	7,1	8,9	13,1
(19,6±3) %	(4,0±3) %	4,3	6,4	8,4	12,2	5,1	8,0	10,3	15,0	5,9	9,2	12,2	17,3

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что при неизменных значениях скорости потока v_0 во входном патрубке ВНС соотношение диаметров ствола и стержня оказывает большее влияние на величину v_{r1} , чем соотношение диаметров входной камеры и ствола. После математической обработки экспериментальных данных была получена следующая зависимость окружной скорости потока на входе в ствол ВНС от его конструктивных и кинематических параметров:

$$v_{r1} = v_0 \cdot K_v \left(\frac{D}{D_c} \right)^{0,5} \left(\frac{D_c}{D_c - d_c} \right)^{0,7}, \quad d_c \leq 0,9D_c, \quad (7)$$

где K_v – коэффициент скорости, $K_v=0,6-0,61$.

На втором этапе исследований определялись окружные скорости v_{ri} в сечениях 2-2...6-6 ствола ВНС при известных значениях v_{r1} для расходов от $5,9 \cdot 10^{-4}$ до $19,6 \cdot 10^{-4}$ м/с. Графики изменения окружных скоростей по высоте ствола Z при различных значениях диаметров входной камеры D и центрального стержня d_c показаны на рис. 2-7. Высота ствола принималась: $Z=0$ – для сечения 1-1 и $Z=1,0$ м – для сечения 6-6. Как видно из графиков, наиболее значимое снижение окружной скорости вращательного потока в стволе ВНС наблюдается при максимальных значениях скорости в первом сечении v_{r1} и диаметра внутреннего стержня d_c . В отсутствие центрального стержня величины радиальной скорости в рассматриваемых сечениях имеют минимальные значения.

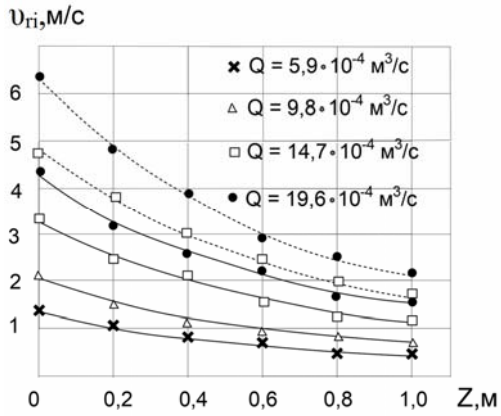


Рис. 2. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=100$ мм:
 ————— $d_c=0$; - - - - - $d_c=15$ мм

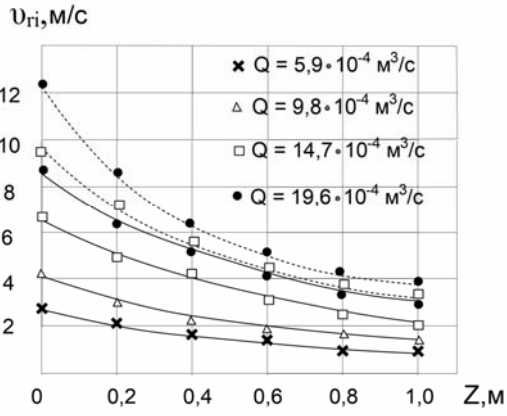


Рис. 3. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=100$ мм:
 ————— $d_c=20$ мм; - - - - - $d_c=25$ мм

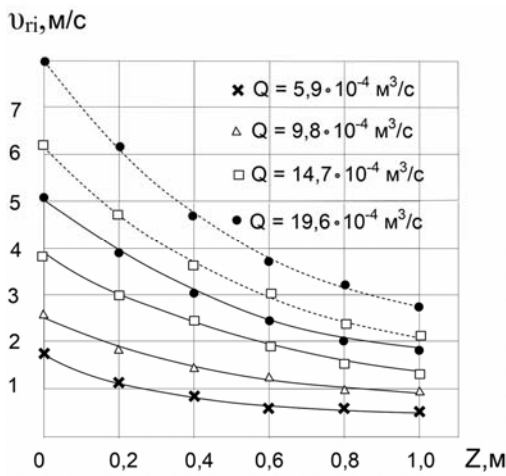


Рис. 4. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=150$ мм:
 ————— $d_c=0$; - - - - - $d_c=15$ мм

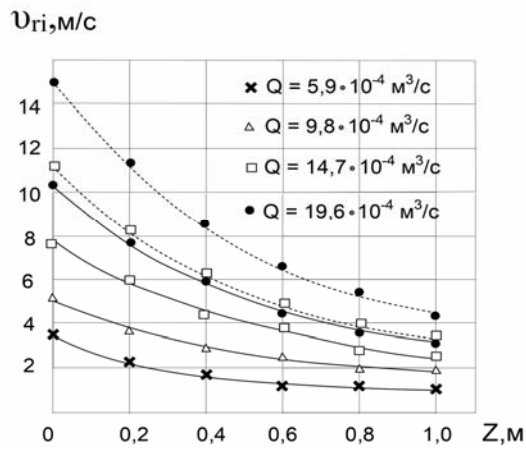


Рис. 5. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=150$ мм:
 ————— $d_c=20$ мм; - - - - - $d_c=25$ мм

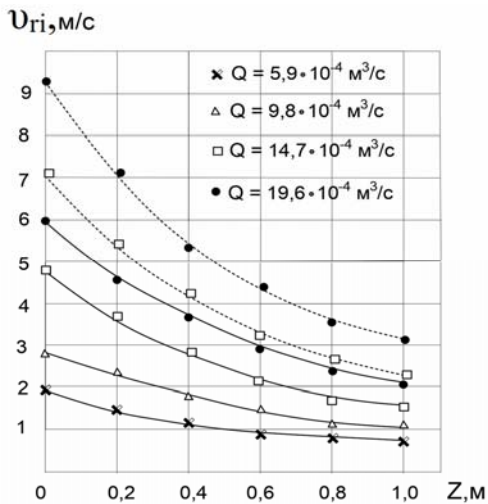


Рис. 6. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=200$ мм:
 ————— $d_c=0$; - - - - - $d_c=15$ мм

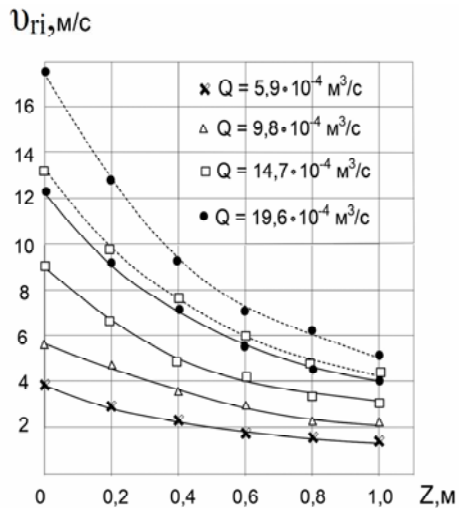


Рис. 7. Графики изменения окружных скоростей потока по высоте ствола при $D=200$ мм:
 ————— $d_c=20$ мм; - - - - - $d_c=25$ мм

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить следующую зависимость окружной скорости от высоты ствола и его конструктивных параметров:

$$v_{ri} = v_{r1} \cdot (1 + Z_i)^n, \quad 0 \leq Z_i \leq 1,0 \text{ м}, \quad (8)$$

$$n = -(1,4 + 0,08) \frac{D_c}{D_c - d_c}, \quad d_c \leq 0,9 D_c. \quad (9)$$

На рис. 8 представлены графики зависимостей $v_d = f(v_0)$, полученные расчётным путём.

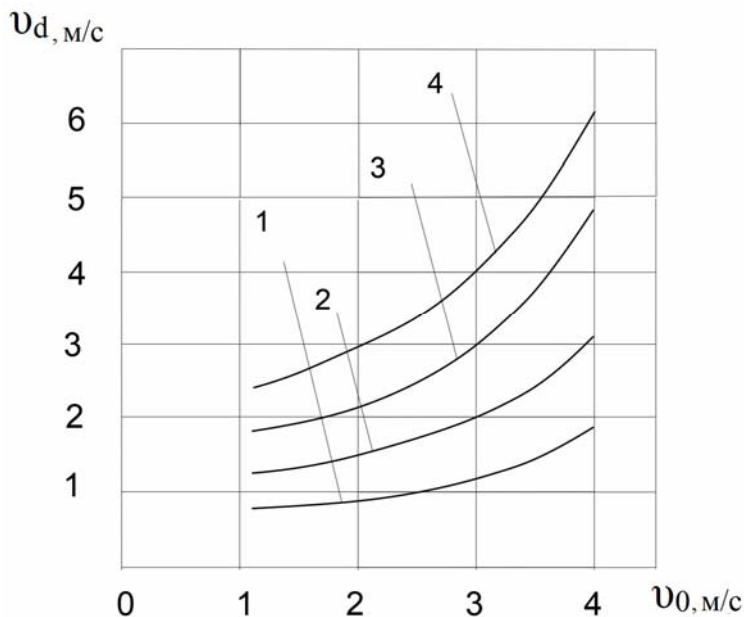


Рис. 8. Графики зависимостей продольной скорости в стволе от скорости во входном патрубке: 1 – при $d_c = 0$; 2 – при $d_c = 15$ мм; 3 – при $d_c = 20$ мм; 4 – при $d_c = 25$ мм

Сравнение величин v_{ri} , приведённых на графиках рис. 2-7, и величин v_d на графиках рис. 8, показало, что соотношение $v_{ri} \geq v_d$, когда окружная скорость потока вносит более значимый вклад в диссипацию энергии по сравнению с продольной скоростью, выдерживается при высоте (длине) ствола $Z = 0,4 - 0,6$ м для $D = 100$ мм, при $Z = 0,6 - 0,8$ м для $D = 150$ мм и при $Z = 0,8 - 1,0$ м для $D = 200$ мм во всём диапазоне расходов воды и величин d_c . Таким образом, наиболее эффективное использование энергии вращательного потока воды в стволе (вихревой камере) ВНС при заданных значениях ее расхода обеспечивается при следующих конструктивных параметрах данного устройства: $0,6 \leq Z (H) \leq 0,8$ м, $\frac{D}{D_c} = 4,7 - 6,2$, $\frac{D_c}{d_c} = 1,6 - 2,1$. При необходимости

увеличения времени смешения воды с реагентами или воздухом целесообразным вариантом будет не удлинение вихревой камеры ВНС, а последовательное соединение друг с другом нескольких вихревых напорных смесителей с лимитируемыми конструктивными параметрами $H(Z)$, D , D_c и d_c .

ВЫВОДЫ

1. Основным параметром, влияющим на диссипацию энергии в вихревом напорном смесителе, является величина окружной скорости потока в кольцевом пространстве ствола, образованном стенками ствола и центральным стержнем.

2. При неизменных значениях скорости потока во входном патрубке смесителя соотношение диаметров ствола и центрального стержня оказывает большее влияние на

величину окружной скорости в начальном сечении ствола, чем соотношение диаметров входной камеры и ствола.

3. Наиболее значимое снижение величины окружной скорости потока при его движении от начального до конечного сечения в кольцевом пространстве ствола смесителя наблюдается при максимальных значениях скорости в начальном сечении ствола и диаметра центрального стержня.

4. Определены конструктивные параметры вихревого напорного смесителя, обеспечивающие эффективное использование энергии вращательного потока воды в стволе смесительного устройства.

5. Предложены математические зависимости для определения окружных скоростей движения потока в начальном и произвольно выбранном сечениях ствола (вихревой камеры) напорного смесителя. Полученные зависимости могут быть использованы при расчёте и конструировании вихревых напорных смесителей, используемых в технологиях физико-химической очистки природных и сточных вод.

Список литературы

1. Kato, S. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques / S. Kato, Y. Kansha // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – 31. – P. 51064–51097.
2. Sahu, O.P. Review on chemical treatment of industrial waste water / O.P. Sahu, P.K. Chaudhari // *Journal of Applied Science and Environmental Management*. – 2013. – 17(2). – P. 241–257.
3. Бутко, А.В. Применение водовоздушного перемешивания в процессах смешения и хлопьеобразования / А.В. Бутко, В.А. Михайлов, М.Ю. Баринов // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 1995. – №7. – С. 20–22.
4. Бабенков, Е.Д. Режим перемешивания воды в процессах водоподготовки / Е.Д. Бабенков // *Химия и технология воды*. – 1984. – Т.6, №3. – С. 195–200.
5. Bouyer, D. Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank / D. Bouyer, A. Line, Z. Do-Quang // *AIChE Journal*. – 2004. – 50 (9). – P.2064–2081.
6. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G. Craham // *Water Research*. – 2015. – 84. – P. 333–341.
7. Tauscher, W. Static mixing and reaction technology / W. Tauscher // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 1996. – 32(3). – P. 224–237.
8. Драгинский, В.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, С.В. Гетманцев. – Москва, 2005. – 576 с.
9. Grishin, B.M. Water purification of a surface source with the use of concentrated coagulation and aeration / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.N. Koshev, N.G. Vilkova, K.L. Chertes // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. – 11.14. – P. 8149–8152.
10. Гришин, Б.М. Оценка технологических параметров вихревого смесительного устройства флотационной установки / Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, Н.Н. Ласьков, Ю.П. Перельгин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 2(47). – С.118–124.

References

1. Kato, S. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques / S. Kato, Y. Kansha // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – 31. – P. 51064–51097.
2. Sahu, O.P. Review on chemical treatment of industrial waste water / O.P. Sahu, P.K. Chaudhari // *Journal of Applied Science and Environmental Management*. – 2013. – 17(2). – P. 241–257.

3. Butko, A.V. Application of water-air mixing in mixing and flocculation processes / A.V. Butko, V.A. Mikhailov, M.Yu. Barinov // *Water supply and sanitary engineering*. – 1995. – No.7. – P. 20–22.
4. Babenkov, E.D. Water mixing mode in water treatment processes / E.D. Babenkov // *Chemistry and technology of water*. – 1984. – Vol. 6, No.3. – P. 195–200.
5. Bouyer, D. Experimental analysis of floc size distribution under different hydrodynamics in a mixing tank / D. Bouyer, A. Line, Z. Do-Quang // *AIChE Journal*. – 2004. – 50 (9). – P.2064–2081.
6. Yamuna, S.V. Application of low-mixing energy for the coagulation process / S.V. Yamuna, A.G. Craham // *Water Research*. – 2015. – 84. – P. 333–341.
7. Tauscher, W. Static mixing and reaction technology / W. Tauscher // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 1996. – 32(3). – P. 224–237.
8. Draginsky, V.L. Coagulation in the technology of natural water purification / V.L. Draginsky, L.P. Alekseeva, S.V. Getmancev. – Moscow, 2005. – 576 p.
9. Grishin, B.M. Water purification of a surface source with the use of concentrated coagulation and aeration / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, A.N. Koshev, N.G. Vilkova, K.L. Chertes // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. – 11.14. – P. 8149–8152.
10. Grishin, B.M. Assessment of technological parameters of a vortex mixing device for a flotation plant / B.M. Grishin, M.V. Bikunova, N.N. Laskov, Yu.P. Perelygin // *Regional architecture and engineering*. – 2021. – No.2(47). – P.118–124.

УДК 66.045.122

DOI 10.54734/20722958_2026_2_148

Вологодский государственный университет
Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15,
тел.: +7 (8172) 72-46-45

Павлов Михаил Васильевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Теплогазоводоснабжение»
E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Карпов Денис Федорович,
соискатель ученой степени кандидата
технических наук, старший преподаватель
кафедры «Теплогазоводоснабжение»
E-mail: karpovdf@vogu35.ru

ООО «Газпром трансгаз Краснодар»
Россия, 350051, г. Краснодар,
ул. Дзержинского, д. 36,
тел.: +7 (861) 224-08-68

Агафонов Роман Владимирович,
руководитель группы измерения расхода
и контроля качества углеводородных сред
Службы автоматизации и метрологического
обеспечения Инженерно-технического
центра
E-mail: vonofaga@bk.ru

АО «ГСП Инжиниринг»
Россия, 394033, г. Воронеж,
Ленинский проспект, д. 119,
тел.: +7 (473) 226-36-04

Писаренко Кирилл Викторович,
инженер производственно-технического
отдела 1 категории
E-mail: kirill.pisarenko@gmail.com

ООО «Северная сбытовая компания»
Россия, 160000, г. Вологда,
ул. Зосимовская, д. 49,
тел.: +7 (8172) 23-15-15

Жукова Валерия Павловна,
специалист
E-mail: ranel19@yandex.ru

Vologda State University
Russia, 160000, Vologda, 15, Lenin St.,
tel.: +7 (8172) 72-46-45

Pavlov Mikhail Vasil'evich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department «Heat,
Gas and Water Supply»
E-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Karpov Denis Fedorovich,
Applicant for the Degree of Candidate of
Sciences, Senior Lecturer of the Department
«Heat, Gas and Water Supply»
E-mail: karpovdf@vogu35.ru

LLC «Gazprom Transgaz Krasnodar»
Russia, 350051, Krasnodar, 36,
Dzerzhinsky St.,
tel.: +7 (861) 224-08-68

Agafonov Roman Vladimirovich,
Head of the Hydrocarbon Flow Measurement
and Quality Control Department, Automation
and Metrological Support Service,
Engineering and Technical Center
E-mail: vonofaga@bk.ru

JSC «GSP Engineering»
Russia, 394033, Voronezh, 119,
Leninsky Avenue,
tel.: +7 (473) 226-36-04

Pisarenko Kirill Viktorovich,
Engineer of the Production and Technical
Department of the 1st Category
E-mail: kirill.pisarenko@gmail.com

LLC «Northern Sales Company»
Russia, 160000, Vologda,
49, Zosimovskaya St.,
tel.: +7 (8172) 23-15-15

Zhukova Valeriya Pavlovna,
Specialist
E-mail: ranel19@yandex.ru

ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА КОЖУХОТРУБНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, Р.В. Агафонов, К.В. Писаренко, В.П. Жукова

Предложен метод программного расчета суммарной площади сечения трубок для нагреваемого теплоносителя в кожухотрубном подогревателе, который учитывает текущие цены на теплообменное оборудование, а также стоимость электрической энергии, предназначенной для транспортировки теплоносителей через теплообменник в течение расчетного периода времени. Предлагаемая формула для расчета получена на основе решения оптимизационной задачи и не противоречит нормативной методике теплового и гидравлического расчета кожухотрубных подогревателей, так как выведена на основе теоретических и эмпирических уравнений, поправочных и эксплуатационных

коэффициентов, а также справочных материалов, которые приводятся в действующем своде правил.

Ключевые слова: кожухотрубный подогреватель, греющий теплоноситель, нагреваемый теплоноситель, оптимизационная задача

SELECTION OF SHELL-AND-TUBE HEATER SIZE FOR DOMESTIC HOT WATER SYSTEM BASED ON AN OPTIMIZATION PROBLEM

M.V. Pavlov, D.F. Karpov, R.V. Agafonov, K.V. Pisarenko, V.P. Zhukova

A computational method is proposed for determining the total cross-sectional area of tubes for the heated fluid in a shell-and-tube heater. The method takes into account current prices of heat exchange equipment as well as the cost of electricity required for transporting fluids through the heat exchanger over the calculation period. The proposed formula is derived as a solution to an optimization problem and does not contradict the established methodology of thermal and hydraulic calculations of shell-and-tube heaters, since it is obtained from theoretical and empirical equations, correction and operational coefficients, and reference data provided in the current code of practice.

Keywords: shell-and-tube heater, heating fluid, heated fluid, optimization problem

Введение. Теплообменные аппараты нашли широкое применение в строительстве, энергетике и других отраслях промышленности (в химической, металлургической, нефтяной, пищевой и др.) для обмена тепловой энергией между двумя или несколькими рабочими средами, обычно именуемыми теплоносителями [1, 2]. Проектирование теплообменного оборудования (выбор необходимого типоразмера теплообменника), наряду с конструированием, монтажом и использованием в быту и на производстве, должно осуществляться с учетом общей сложности тепловых и гидравлических процессов [3, 4]. При этом необходимо учитывать влияние эксплуатационных факторов (грязи и окалины на поверхности теплообмена, жесткости воды, коррозионных процессов и т. п.), а также технико-экономических показателей [5, 6, 7].

В работе [8] рассмотрены такие известные методы проектирования кожухотрубных теплообменников, как логарифмическая средняя разница температур (LMTD) и метод количества передаточных единиц (ϵ -NTU). В первом случае вычисляется среднелогарифмический температурный напор, и на его основе рассчитывается требуемая тепловая производительность теплообменника. В методе ϵ -NTU используется коэффициент эффективности теплообменника ϵ , который характеризует соотношение между фактическим тепловым потоком от греющего к нагреваемому теплоносителю и максимально возможным при заданных условиях. Метод ϵ -NTU применяется в тех случаях, когда недостаточно информации для расчета теплообменного аппарата по методу LMTD. Данный метод также полезен для оценки эффективности работы теплообменника, когда известны его геометрические размеры (в случае поверочного расчета). Для определения коэффициента теплопередачи и требуемой площади теплообменного аппарата рекомендуется, как более точный, использовать метод LMTD [9].

Для программного моделирования конструкции кожухотрубного теплообменника и расчета оптимальных параметров его работы широко используется полуаналитический метод Белла-Делавэра (Bell-Delaware), который позволяет точнее прогнозировать интенсивность теплообмена между теплоносителями (рассчитывать коэффициент теплопередачи) и определять потери давления по сравнению с методами Белла (Bell) и Керна (Kern) [10, 11].

В статье [12] рассматривается методика расчета оптимальных параметров теплообменника по критерию минимального теплового эквивалента для воздушных сред и допустимого значения скорости движения воздуха. Авторы публикации предлагают усовершенствованную методику подбора теплоутилизационного оборудования с учетом содержания вредных веществ в уходящем воздухе и условий пожаровзрывобезопасности в производственном помещении.

Разработка конструкции кожухотрубного теплообменника может быть осуществлена в системе автоматизированного проектирования (САПР), которая позволяет

моделировать все основные элементы теплообменника с учетом действующих механических напряжений. Применение САПР дает возможность не только производить прочностные расчеты, но и корректировать размеры эскизов, моделировать процесс работы теплообменного оборудования [13].

Для выбора необходимого типоразмера водоподогревателя, согласно СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов», следует предварительно задаться оптимальной скоростью нагреваемой воды в трубках, равной во всех случаях $W_{тр} = 1 \text{ м/с}$, и исходя из двухпоточной компоновки каждой ступени вычислить требуемое сечение трубок водоподогревателя по уравнению (приведены оригинальные обозначения и авторские пояснения физических величин в формуле):

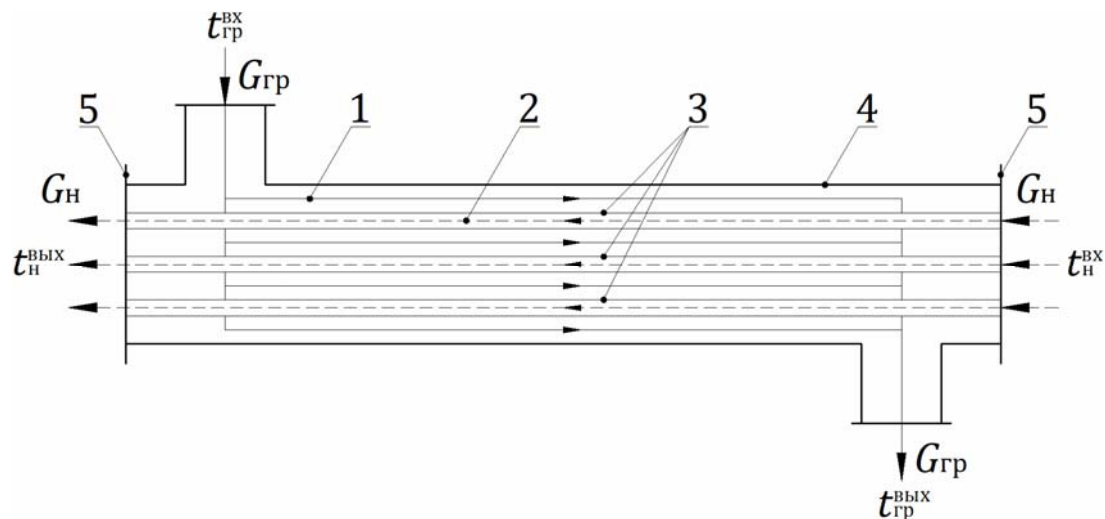
$$f_{тр}^{усл} = \frac{G_{h\max}}{2 \cdot 3600 W_{тр} \rho}, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где $G_{h\max}$ – максимальный расход воды в системе горячего водоснабжения, кг/ч; $W_{тр}$ – оптимальная скорость нагреваемой воды в трубках горизонтального кожухотрубного водо-водяного подогревателя, принимается равной 1,0 м/с; ρ – плотность воды при средней температуре $t_{ср}$, °С, ориентировочно принимается равной 1000 кг/м³.

Требуемая площадь сечения трубок в кожухотрубном теплообменнике также может быть рассчитана через оптимальный диаметр трубок, который определяется с учетом энергетических затрат на перемещение греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно в межтрубном пространстве и трубках, амортизационных отчислений на капитальные затраты и оборотных средств на обслуживание и ремонт теплообменника [14].

Выбор типоразмера кожухотрубного подогревателя также возможен исходя из минимальных капитальных вложений на приобретение, установку и обслуживание теплообменного оборудования в текущих ценах за расчетный период времени, как и в случае выбора диаметра трубопровода, предназначенного для транспортировки теплоносителя [15].

Материалы и методы исследований. На рисунке представлена расчетная схема движения греющего и нагреваемого теплоносителей в отдельной секции кожухотрубного подогревателя.



Расчетная схема движения греющего и нагреваемого теплоносителей в кожухотрубном подогревателе:

- 1 – греющий теплоноситель; 2 – нагреваемый теплоноситель; 3 – трубки; 4 – корпус;
5 – трубные решетки

Согласно рисунку, греющий теплоноситель 1 с массовым расходом $G_{\text{тр}}$ движется слева направо в межтрубном пространстве кожухотрубного подогревателя, образованном наружными поверхностями трубок 3 и внутренней поверхностью корпуса 4 теплообменника. Расчетная температура греющего теплоносителя 1 на входе в кожухотрубный подогреватель составляет $t_{\text{гр}}^{\text{вх}}$, на выходе – $t_{\text{гр}}^{\text{вых}}$. Нагреваемый теплоноситель 2 с массовым расходом $G_{\text{н}}$, движущийся в противоположном направлении, равномерно распределяется по трубкам 3, закрепленным в трубных решетках 5 теплообменника. Известно, что расчетная температура нагреваемого теплоносителя 2 на входе в кожухотрубный подогреватель составляет $t_{\text{н}}^{\text{вх}}$, на выходе – $t_{\text{н}}^{\text{вых}}$. Схема движения греющего и нагреваемого теплоносителей в кожухотрубном подогревателе – противоточная.

Как отмечено ранее, выбор необходимого типоразмера кожухотрубного подогревателя в соответствии с СП 41-101-95 сводится к определению требуемой площади сечения всех трубок 3 в одном направлении движения нагреваемого теплоносителя 2 $f'_{\text{тр}}$ (в формуле (1) – $f_{\text{тр}}^{\text{усл}}$), т. е. в одном ходу теплообменника. Согласно уравнению неразрывности (сплошности) потока жидкости (1), при заданном расходе нагреваемого теплоносителя 2 $G_{\text{н}}$ скорость его течения в трубках 3 $W_{\text{тр}}$ будет зависеть от величины

$f'_{\text{тр}}$, причем $W_{\text{тр}} \sim \frac{1}{f'_{\text{тр}}}$. Плотность нагреваемого теплоносителя 2 $\rho_{\text{н}}$, несмотря на

зависимость от температуры, меняется в результате нагрева незначительно и, как следствие, на величину $W_{\text{тр}}$ не оказывает большого влияния. В свою очередь, скорость

нагреваемого теплоносителя 2 $W_{\text{тр}}$ играет ключевую роль в тепловых и гидравлических процессах, происходящих в теплообменной установке. Ситуация усложняется тем, что для этих двух процессов влияние величины $W_{\text{тр}}$ взаимно противоположное.

Рассмотрим это на примере оптимальной скорости нагреваемого теплоносителя 2 в трубках 3 кожухотрубного подогревателя $W_{\text{тр}} = 1,0 \text{ м/с}$, значение которой заявлено в СП 41-101-95. В случае $W_{\text{тр}} > 1,0 \text{ м/с}$ произойдет интенсификация теплообмена, так

как коэффициент теплоотдачи от трубок 3 к нагреваемому теплоносителю 2 $\alpha_2 \sim W_{\text{тр}}^{0,8}$. Последнее скажется на размерах теплообменника и капитальных вложениях на его приобретение и установку, так как требуемая площадь поверхности нагрева F при увеличении коэффициента теплопередачи k , согласно уравнению теплообмена, должна стать меньше. С другой стороны, турбулизация потока приведет к закономерному увеличению потерь давления для нагреваемого теплоносителя 2, так

как, согласно закону Дарси-Вейсбаха, $\Delta P_{\text{н}} \sim W_{\text{тр}}^2$. В итоге это скажется на увеличении потребления электрической энергии, расходуемой на транспортировку нагреваемого теплоносителя 2 через кожухотрубный подогреватель, и приведет к закономерному росту денежных затрат на эксплуатацию теплообменника за расчетный период времени. В случае $W_{\text{тр}} < 1,0 \text{ м/с}$ будет иметь место диаметрально противоположная

ситуация: $F \uparrow$ и $\Delta P_{\text{н}} \downarrow$. Таким образом, определение требуемой площади сечения трубок $f'_{\text{тр}}$ сводится к решению оптимизационной задачи, т.е. к поиску наилучшего соотношения тепловых и гидравлических процессов в теплообменнике. Таким критерием, характеризующим оптимальное соотношение тепловых и гидравлических процессов в теплообменном аппарате, могут стать суммарные капитальные вложения на приобретение, установку и эксплуатацию кожухотрубного подогревателя за расчетный период времени.

Исходя из вышеизложенных соображений, формула для определения капитальных вложений на приобретение, установку и эксплуатацию кожухотрубного подогревателя, предназначенного для нужд горячего водоснабжения, в течение расчетного периода времени с учетом тепловой и гидравлической составляющих может быть записана следующим образом (см. рисунок):

$$Z \approx F\Pi_F + k_3 \left(\frac{G_{гр} \Delta P_{гр}}{\rho_{гр} \eta_{сн}} + \frac{G_{н} \Delta P_{н}}{\rho_{н} \eta_{цн}} \right) \Delta z T_{э}, \text{ руб.}, \quad (2)$$

где F – требуемая площадь поверхности нагрева кожухотрубного подогревателя, м^2 ; Π_F – цена 1 м^2 поверхности нагрева кожухотрубного подогревателя, руб./ м^2 , которая включает в себя стоимость теплообменной установки, а также денежные затраты на проектные, строительные-монтажные и пусконаладочные работы, т.е. суммарные капитальные вложения; k_3 – коэффициент запаса мощности, учитывающий случайные перегрузки электродвигателей насосов, обычно принимается равным $1,1 \div 1,3$; $G_{гр}$ и $G_{н}$ – расчетные массовые расходы соответственно греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, кг/с ; $\Delta P_{гр}$ и $\Delta P_{н}$ – потери давления в кожухотрубном подогревателе соответственно для греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, Па ; $\rho_{гр}$ и $\rho_{н}$ – плотность воды соответственно при средней температуре греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей, кг/м^3 ; $\eta_{сн}$ – коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса; $\eta_{цн}$ – коэффициент полезного действия (КПД) циркуляционного насоса; Δz – расчетный период эксплуатации кожухотрубного подогревателя, с ; $T_{э}$ – тариф на электрическую энергию, руб./Дж.

После математических преобразований уравнение (2) примет более развернутый вид:

$$Z \approx \frac{Q_{\max}}{\psi \beta \Delta t_{\text{ср}}} \left[\frac{d_{\text{экв}}^{0,2}}{A(t_{гр}^{\text{ср}}) \left(\frac{G_{гр}}{\rho_{гр} f_{\text{мтр}}} \right)^{0,8}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{d_{\text{вн}}^{0,2}}{A(t_{н}^{\text{ср}}) \left(\frac{G_{н}}{\rho_{н} f_{\text{тр}}} \right)^{0,8}} \right] \times \left\{ \Pi_F + \frac{k_3}{f_{\text{сек}}} \left[\left(\frac{B G_{гр}^3}{\rho_{гр}^3 \eta_{сн} f_{\text{мтр}}^2} + \frac{\varepsilon_i \Phi G_{н}^3}{\rho_{н}^3 \eta_{цн} f_{\text{тр}}^2} \right) \right] \Delta z T_{э} \right\}, \text{ руб.}, \quad (3)$$

где Q_{\max} – расчетная тепловая производительность кожухотрубного подогревателя, Вт ; ψ – коэффициент эффективности теплообмена; для гладкотрубных водоподогревателей с опорами в виде полок (по данным СП 41-101-95) $\psi = 0,95$; β – коэффициент, учитывающий загрязнение поверхностей трубок 3, в зависимости от химических свойств воды принимается равным $0,80 \div 0,95$; $\Delta t_{\text{ср}}$ – среднелогарифмический температурный напор между греющим 1 и нагреваемым 2 теплоносителями, $^{\circ}\text{C}$; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр межтрубного пространства кожухотрубного подогревателя, м ; $A(t_{гр}^{\text{ср}})$ и $A(t_{н}^{\text{ср}})$ – теплообменные коэффициенты, зависящие от средней температуры соответственно греющего 1 и нагреваемого 2 теплоносителей (табл. 1); $f_{\text{мтр}}$ – площадь сечения межтрубного пространства кожухотрубного подогревателя, м^2 ; $\delta_{\text{ст}}$ и $\lambda_{\text{ст}}$ – соответственно толщина стенки, м , и коэффициент теплопроводности

латунных трубок 3, Вт/(м·К). Например, в соответствии с требованиями СП 41-101-95 коэффициент теплопроводности латуни при отсутствии технических данных может быть принят равным 105 Вт/(м·К); $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубок 3 кожухотрубного подогревателя, м; $f_{\text{тр}}$ – площадь сечения всех трубок 3 в одном ходу кожухотрубного подогревателя, м²; $f_{\text{сек}}$ – площадь поверхности нагрева одной секции кожухотрубного подогревателя, м²; B – гидравлический коэффициент для греющего теплоносителя 1, который по данным СП 41-101-95 зависит от наружного диаметра корпуса 4 $D_{\text{н}}$, мм, и длины l , м, секции кожухотрубного подогревателя (табл. 2); ε_l – поправочный коэффициент, который при длине секции кожухотрубного подогревателя $l = 2$ м принимается равным 5000, а при длине секции $l = 4$ м – 7500; φ – коэффициент, учитывающий накипеобразование. Согласно СП 41-101-95, принимается по опытным данным, при их отсутствии $\varphi = 2,0 \div 3,0$.

Т а б л и ц а 1

Теплообменный коэффициент A

$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A	1401	1608	1804	1990	2168	2337	2498	2649	2792	2926	3051

П р и м е ч а н и е . Средняя температура теплоносителя численно равна $t_{\text{ср}} = 0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}})$.

Т а б л и ц а 2

Гидравлический коэффициент B

Наружный диаметр корпуса секции $D_{\text{н}}$, мм	Длина секции l , м	
	2	4
57	25000	30000
76	25000	30000
89	25000	30000
114	18000	25000
168	11000	25000
219	11000	20000
273	11000	20000
325	11000	20000

Так как в соответствии с СП 41-101-95 типоразмер кожухотрубного подогревателя выбирается исходя из требуемого сечения трубок 3, то для нахождения экстремума функции $Z = 3(f_{\text{тр}})$ определим ее первую производную и приравняем полученный

результат к нулю, т.е. $\frac{dZ}{df_{\text{тр}}} = 0$. После окончательных математических преобразований

итоговое уравнение может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\alpha_F f_{\text{сек}}}{k_3 \Delta z T_{\text{эз}}} = \frac{2,5 \varepsilon_l \varphi A(t_{\text{н}}^{\text{ср}}) G_{\text{н}}^{3,8}}{\rho_{\text{н}}^{3,8} \eta_{\text{сн}} d_{\text{вн}}^{0,2} f_{\text{тр}}^{2,8}} \times$$

$$\times \left[\frac{d_{\text{экв}}^{0,2}}{A(t_{\text{тр}}^{\text{ср}}) \left(\frac{G_{\text{тр}}}{\rho_{\text{тр}} f_{\text{мтр}}} \right)^{0,8}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{d_{\text{вн}}^{0,2}}{A(t_{\text{н}}^{\text{ср}}) \left(\frac{G_{\text{н}}}{\rho_{\text{н}} f'_{\text{тр}}} \right)^{0,8}} \right] - \left(\frac{B G_{\text{тр}}^3}{\rho_{\text{тр}}^3 \eta_{\text{сн}} f_{\text{мтр}}^2} + \frac{\varepsilon_l \varphi G_{\text{н}}^3}{\rho_{\text{н}}^3 \eta_{\text{сн}} f_{\text{тр}}'^2} \right), \quad (4)$$

где $f'_{\text{тр}}$ – требуемая (оптимальная) площадь сечения всех трубок 3 в одном ходу кожухотрубного подогревателя, м².

Результаты исследований. Рассмотрим программное решение уравнения (4) на примере I ступени кожухотрубного подогревателя для системы горячего водоснабжения (ГОСТ 27590) центрального теплового пункта (ЦТП) при двухпоточной схеме подключения, т. е. массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей равномерно распределяются по параллельно установленным секциям теплообменной установки.

Исходные данные для выполнения теплового и гидравлического расчета, представленные в СП 41-101-95, следующие:

1. Расчетная тепловая производительность кожухотрубного подогревателя $Q_{\text{max}} = 2,76 \cdot 10^6$ Вт.

2. Расчетный массовый расход греющего теплоносителя (сетевой воды), движущегося в межтрубном пространстве, $G_{\text{гр}} = 62,5 \cdot 10^3$ кг/ч ($\approx 17,4$ кг/с). Расчетный массовый расход нагреваемого теплоносителя (водопроводной воды), движущегося в трубках, $G_{\text{н}} = 68 \cdot 10^3$ кг/ч ($\approx 18,9$ кг/с).

3. Расчетная температура греющего теплоносителя (сетевой воды) на входе и на выходе из кожухотрубного подогревателя соответственно равна $t_{\text{гр}}^{\text{вх}} = 55$ °С и $t_{\text{гр}}^{\text{вых}} = 17$ °С.

Средняя плотность греющего теплоносителя $\rho_{\text{гр}} \approx 993,6$ кг/м³. Расчетная температура нагреваемого теплоносителя (водопроводной воды) на входе и на выходе из кожухотрубного подогревателя соответственно равна: $t_{\text{н}}^{\text{вх}} = 2$ °С и $t_{\text{н}}^{\text{вых}} = 37$ °С. Средняя плотность нагреваемого теплоносителя $\rho_{\text{н}} \approx 998,3$ кг/м³. Средний логарифмический температурный напор по расчету составил: $\Delta t_{\text{cp}} \approx 16,5$ °С. Исходя из табл. 1, теплообменные коэффициенты при значениях $t_{\text{гр}}^{\text{cp}} = 36,0$ °С и $t_{\text{н}}^{\text{cp}} = 19,5$ °С соответственно равны: $A(t_{\text{гр}}^{\text{cp}}) \approx 2098$ и $A(t_{\text{н}}^{\text{cp}}) \approx 1794$.

4. Внутренний диаметр, толщина стенки и коэффициент теплопроводности латунных трубок кожухотрубного подогревателя соответственно равны: $d_{\text{вн}} = 0,014$ м, $\delta_{\text{ст}} = 0,001$ м и $\lambda_{\text{ст}} = 105$ Вт/(м·К).

5. Коэффициент эффективности теплообмена для прямых гладких трубок с блоком опорных перегородок $\psi = 1,2$. Коэффициент, учитывающий загрязнение поверхностей трубок, принят равным $\beta = 0,90$. Коэффициент, учитывающий накипеобразование, составляет: $\phi = 2,0$.

6. Общие капитальные вложения в приобретение, установку и обслуживание кожухотрубного подогревателя для системы горячего водоснабжения ЦТП приблизительно равны: $\text{Ц}_F = 8890$ руб./м².

7. Параметры эксплуатации насосного оборудования. Расчетная продолжительность работы системы горячего водоснабжения в течение календарного года $\Delta z = 350$ сут ($\approx 3,024 \cdot 10^7$ с). Коэффициент запаса мощности для обоих насосов принят одинаковым $k_3 = 1,2$. Коэффициент полезного действия (КПД) сетевого насоса $\eta_{\text{сн}} = 63,0\%$. Коэффициент полезного действия (КПД) циркуляционного насоса $\eta_{\text{цн}} = 29,0\%$. Тариф на электрическую энергию составляет: $T_{\text{э}} = 6,37$ руб./(кВт·ч) ($\approx 1,769 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж).

В табл. 3 представлены результаты программного расчета $f'_{\text{тр}}$, м^2 , по уравнению (4) с учетом технических характеристик кожухотрубных подогревателей (ГОСТ 27590): наружного диаметра корпуса секции $D_{\text{н}}$, мм; длины секции l , м; площади сечения межтрубного пространства $f_{\text{мтр}}$, м^2 ; площади сечения трубок $f_{\text{тр}}$, м^2 ; эквивалентного диаметра межтрубного пространства $d_{\text{экв}}$, м; поверхности нагрева одной секции $f_{\text{сек}}$, м^2 .

Т а б л и ц а 3

Результаты определения требуемой площади сечения всех трубок

$D_{\text{н}}$, мм	57	76	89	114	168	219	273	325
$f_{\text{тр}}$, м^2	0,00062	0,00108	0,00154	0,00293	0,00570	0,00939	0,01679	0,02325
$f'_{\text{тр}}$, м^2 ($l = 2$ м)	0,00217	0,00429	0,00592	0,00933	0,01396	0,01357	0,01177	0,01147
$f'_{\text{тр}}$, м^2 ($l = 4$ м)	0,00238	0,00468	0,00640	0,00923	0,01234	<u>0,01214</u>	0,01056	0,01029

В соответствии с табл. 3 при $f'_{\text{тр}} = 0,01214 \text{ м}^2$ наиболее подходящим оказался горизонтальный секционный скоростной кожухотрубный подогреватель (ГОСТ 27590) со следующими техническими характеристиками: $D_{\text{н}} = 219 \text{ мм}$; $f_{\text{мтр}} = 0,02139 \text{ м}^2$; $f_{\text{тр}} = 0,00939 \text{ м}^2$; $d_{\text{экв}} = 0,0224 \text{ м}$; $f_{\text{сек}} = 11,51 \text{ м}^2$ (при длине секции $l = 4$ м).

В табл. 4 приведены результаты расчета по уравнению (3) абсолютных Z , руб., и относительных δZ , %, капитальных вложений на приобретение и установку кожухотрубного подогревателя в двухпоточном исполнении (δZ_F) с учетом денежных затрат на электрическую энергию ($\delta Z_{\text{э}}$), расходуемую за расчетный период времени на транспортировку греющего и нагреваемого теплоносителей через теплообменник.

Т а б л и ц а 4

Капитальные вложения на установку кожухотрубного подогревателя

$D_{\text{н}}$, мм	57	76	89	114	168	219	273	325
Z , млн руб.	196,1	57,1	25,8	5,78	1,88	1,40	1,46	1,86
	139,2	40,9	18,6	4,36	1,60	<u>1,30</u>	1,43	1,85
δZ_F , %	0,05	0,3	0,9	5,6	33,1	69,1	92,5	97,1
	0,08	0,4	1,2	7,4	38,8	<u>74,6</u>	94,1	97,7
$\delta Z_{\text{э}}$, %	99,95	99,7	99,1	94,4	66,9	30,9	7,5	2,9
	99,92	99,6	98,8	92,6	61,2	<u>25,4</u>	5,9	2,3

П р и м е ч а н и е. Верхнее число в ячейке – при длине секции кожухотрубного подогревателя $l = 2$ м; нижнее число – при $l = 4$ м.

С экономической точки зрения, согласно табл. 4, наиболее целесообразным также является горизонтальный секционный скоростной кожухотрубный подогреватель (ГОСТ 27590) с техническими характеристиками: $D_{\text{н}} = 219 \text{ мм}$; $f_{\text{мтр}} = 0,02139 \text{ м}^2$; $f_{\text{тр}} = 0,00939 \text{ м}^2$; $d_{\text{экв}} = 0,0224 \text{ м}$; $f_{\text{сек}} = 11,51 \text{ м}^2$ (при длине секции $l = 4$ м).

В соответствии с СП 41-101-95 выбран аналогичный типоразмер кожухотрубного подогревателя. По результатам программных вычислений (см. табл. 3) оптимальная скорость нагреваемого теплоносителя в трубках кожухотрубного подогревателя, согласно формуле (1), составила $W_{\text{тр}} = 0,78 \text{ м/с}$ (для сравнения в нормативной методике расчета $W_{\text{тр}} = 1,0 \text{ м/с}$).

Представим основные результаты теплового и гидравлического расчета кожухотрубного подогревателя при заданных исходных данных и оптимальных условиях,

т.е. при $f'_{\text{тр}} = 0,01214\text{м}^2$, так как для выбранного типоразмера теплообменника все теплообменные и гидравлические параметры его работы приведены в СП 41-101-95 (указаны в круглых скобках):

1. Скорость греющего теплоносителя $W_{\text{мтр}} = 0,41\text{ м/с}$ (0,41 м/с), скорость нагреваемого теплоносителя $W_{\text{тр}} = 0,78\text{ м/с}$ (1,01 м/с).

2. Коэффициент теплопередачи кожухотрубного подогревателя при расчетных коэффициентах теплоотдачи $\alpha_1 = 2191\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (2187 Вт/(м²·К)) и $\alpha_2 = 3451\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (4222 Вт/(м²·К)) имеет значение $k = 1429\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (1535 Вт/(м²·К)).

3. Требуемая площадь поверхности нагрева I ступени кожухотрубного подогревателя в двухпоточном исполнении составила: $F = 117,36\text{ м}^2$ (108,70 м²).

Потери давления в I ступени кожухотрубного подогревателя в двухпоточном исполнении для греющего теплоносителя равны $\Delta P_{\text{гр}} = 34,0\text{ кПа}$ (23,5 кПа), для нагреваемого теплоносителя – $\Delta P_{\text{н}} = 92,9\text{ кПа}$ (142,0 кПа).

Выводы.

1. Нормативная методика выбора необходимого типоразмера кожухотрубного подогревателя, в частности определение требуемой площади сечения трубок, является менее трудозатратной, чем предлагаемый способ расчета. В рассматриваемом случае основная формула записана в неявном виде, и искомая величина не может быть выражена напрямую. Кроме того, ее значение определяется выбором типоразмера кожухотрубного подогревателя со стандартными техническими характеристиками (например, в соответствии с ГОСТ 27590). Применение современных систем компьютерной алгебры позволяет проводить подобные вычисления без особых трудностей и в течение короткого периода времени.

2. Данный метод программного расчета, разработанный на основе нормативной методики теплового и гидравлического расчета кожухотрубных подогревателей (СП 41-101-95), дает возможность сравнивать в экономическом отношении различные варианты, ориентировочно оценивать капитальные вложения и в итоге выбирать оптимальный типоразмер теплообменной установки. С учетом не только общепринятых параметров, таких, как тепловая производительность, массовые расходы и температура теплоносителей, но и таких важных технико-экономических показателей, как актуальная рыночная цена теплообменника и текущая стоимость электрической энергии, выбор типоразмера кожухотрубного подогревателя в различных ситуациях может различаться.

3. Предлагаемые в статье уравнения (3) и (4) являются универсальными и могут применяться для проектирования кожухотрубных подогревателей (для выполнения тепловых и гидравлических расчетов), в которых греющим и нагреваемым теплоносителями выступает вода.

Список литературы

1. Afgani, Abduh. Evaluating the Thermal Performance of Shell-and-Tube Heat Exchangers: The Role of Flow Rate in Water-Based Systems / Afgani Abduh, Zaidar Chilfi, Sigalingging Wanri, Sukarman Sukarman, Khoirudin Khoirudin, Abdulah Amri. – DOI: 10.36805/jtmmx.v5i1.6129 // Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore. – 2024. – No. 5. – P. 38–49.
2. Gungor, Sahin. ANN-aided optimization study on thermal performance and energy consumption of an industrial shell-and-tube heat exchanger system / Gungor Sahin. – DOI: 10.24294/tse11618 // Thermal Science and Engineering. – 2025. – No. 8. – P. 11618.

3. Nair, Anish. Machine Learning for Prediction of Heat Pipe Effectiveness / Nair Anish, P. Ramkumar and M. Sivasubramanian, Prakash Chander, Dixit Saurav, G. Murali, Nikolai Vatin, Kirill Epifantsev, Kaushal Kumar. – DOI: 10.3390/en15093276 // *Energies*. – 2022. – No. 15. – P. 3276.
4. Romanovski, Valentin. Corrosion Failure of Titanium Tubes of a Heat Exchanger for the Heating of Dissolving Lye / Valentin Romanovski, Yolanda Hedberg, Andrei Paspelau, Vitali Frantskevich, James Noël, Elena Romanovskaia. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105722 // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – No. 129. – P. 105722.
5. Pourhoseini, Seyed. A Comparative Thermal and Economic Investigation of Similar Shell and Tube and Plate Heat Exchangers with Low Concentration Ag-H₂O Nanofluid / Seyed Pourhoseini, Mojtaba Baghban, Maryam Ghodrat. – DOI: 10.3390/en16041854 // *Energies*. – 2023. – No. 16. – P. 1854.
6. Hosseini, H. Development in household water heaters by replacing the shell and tube heat exchangers by inclined flat ones having rectangular fins / H. Hosseini, M.M. Ahmadi Ashrafi, Zohreh Asadi, Davood Domiri Ganji. – DOI: 10.1016/j.csite.2021.101490 // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – No. 28. – P. 101490.
7. Nemivant, Shaunak. Design of tube bundle insert for shell and tube heat exchangers / Shaunak Nemivant, Sushrut Dandawate, Sumit Polas, Varun Joshi. – DOI: 10.64188/3048956325011 // *KT Journal of Mechanical Engineering*. – 2025. – No. 2. – P. 12.
8. Silaipillayarputhur, K. The design of shell and tube heat exchangers – a review / K. Silaipillayarputhur / K. Silaipillayarputhur. – DOI: 10.24247/ijmperdfeb201910 // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. – 2019. – No. 9. – P. 87–102.
9. Escalona, A.A.S. Determination of overall heat transfer coefficients comparing LMTD and ϵ -NTU methods / A.A.S. Escalona, E.G. Leyva. – DOI: 10.24294/tse.v4i1.1511 // *Thermal Science and Engineering*. – 2021. – No. 4. – P. 42–50.
10. Kulkarni, S.Y. Analysis comparing performance of a conventional shell and tube heat exchanger using Kern, Bell and Bell Delaware method / S.Y. Kulkarni, S.B. Jagadish, M.B. Manjunath. – DOI: 10.15623/ijret.2014.0315093 // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2014. – No. 03. – P. 486–496.
11. Gonçalves, C.O. Linear method for the design of shell and tube heat exchangers using the Bell-Delaware method / C.O. Gonçalves, A.L.H. Costa, M.J. Bagajewicz. – DOI: 10.1002/aic.16602 // *AIChE Journal*. – 2019. – No. 65.
12. Овчинников, А.С. Расчет эффективности теплообменников при утилизации вентиляционных выбросов производственных помещений / А.С. Овчинников, М.Н. Жерлькина, С.А. Яременко, К.В. Гармонов. – DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.004 // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. – 2023. – № 1 (24). – С. 35–45.
13. Каменский, М.Н. Особенности проектирования кожухотрубного теплообменного аппарата / М.Н. Каменский, А.М. Козлов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – № 2. – С. 40–43.
14. Голованчиков, А.Б. Расчет оптимального диаметра труб с учетом энерго- и ресурсосбережения / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2019. – № 1 (26). – С. 23–28.
15. Павлов, М.В. Определение оптимального диаметра теплопровода путем решения оптимизационной задачи / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов. – DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-97-103 // *Природообустройство*. – 2025. – № 1. – С. 97–103.

References

1. Afgani, Abduh. Evaluating the Thermal Performance of Shell-and-Tube Heat Exchangers: The Role of Flow Rate in Water-Based Systems / Afgani Abduh, Zaidar Chilfi, Sigalingging Wanri, Sukarman Sukarman, Khoirudin Khoirudin, Abdullah Amri. –

DOI: 10.36805/jtmmx.v5i1.6129 // Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore. – 2024. – No. 5. – P. 38–49.

2. Gungor, Sahin. ANN-aided optimization study on thermal performance and energy consumption of an industrial shell-and-tube heat exchanger system / Gungor Sahin. – DOI: 10.24294/tse11618 // Thermal Science and Engineering. – 2025. – No. 8. – P. 11618.

3. Nair, Anish. Machine Learning for Prediction of Heat Pipe Effectiveness / Nair Anish, P. Ramkumar and M. Sivasubramanian, Prakash Chander, Dixit Saurav, G. Murali, Nikolai Vatin, Kirill Epifantsev, Kaushal Kumar. – DOI: 10.3390/en15093276 // Energies. – 2022. – No. 15. – P. 3276.

4. Romanovski, Valentin. Corrosion Failure of Titanium Tubes of a Heat Exchanger for the Heating of Dissolving Lye / Valentin Romanovski, Yolanda Hedberg, Andrei Paspelau, Vitali Frantskevich, James Noël, Elena Romanovskaia. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105722 // Engineering Failure Analysis. – 2021. – No. 129. – P. 105722.

5. Pourhoseini, Seyed. A Comparative Thermal and Economic Investigation of Similar Shell and Tube and Plate Heat Exchangers with Low Concentration Ag-H₂O Nanofluid / Seyed Pourhoseini, Mojtaba Baghban, Maryam Ghodrat. – DOI: 10.3390/en16041854 // Energies. – 2023. – No. 16. – P. 1854.

6. Hosseini, H. Development in household water heaters by replacing the shell and tube heat exchangers by inclined flat ones having rectangular fins / H. Hosseini, M.M. Ahmadi Ashrafi, Zohreh Asadi, Davood Domiri Ganji. – DOI: 10.1016/j.csite.2021.101490 // Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – No. 28. – P. 101490.

7. Nemivant, Shaunak. Design of tube bundle insert for shell and tube heat exchangers / Shaunak Nemivant, Sushrut Dandawate, Sumit Polas, Varun Joshi. – DOI: 10.64188/3048956325011 // KT Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – No. 2. – P. 12.

8. Silaipillayarputhur, K. The design of shell and tube heat exchangers – a review / K. Silaipillayarputhur / K. Silaipillayarputhur. – DOI: 10.24247/ijmpdfefeb201910 // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2019. – No. 9. – P. 87–102.

9. Escalona, A.A.S. Determination of overall heat transfer coefficients comparing LMTD and ϵ -NTU methods / A.A.S. Escalona, E.G. Leyva. – DOI: 10.24294/tse.v4i1.1511 // Thermal Science and Engineering. – 2021. – No. 4. – P. 42–50.

10. Kulkarni, S.Y. Analysis comparing performance of a conventional shell and tube heat exchanger using Kern, Bell and Bell Delaware method / S.Y. Kulkarni, S.B. Jagadish, M.B. Manjunath. – DOI: 10.15623/ijret.2014.0315093 // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – No. 03. – P. 486–496.

11. Gonçalves, C.O. Linear method for the design of shell and tube heat exchangers using the Bell-Delaware method / C.O. Gonçalves, A.L.H. Costa, M.J. Bagajewicz. – DOI: 10.1002/aic.16602 // AIChE Journal. – 2019. – No. 65.

12. Ovchinnikov, A.S. Calculation of the heat exchangers efficiency when utilizing ventilation emissions from industrial premises / A.S. Ovchinnikov, M.N. Zherlykina, S.A. Yaremenko, K.V. Garmonov. – DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.004 // Housing and Utilities Infrastructure. – 2023. – No. 1 (24). – P. 35–45.

13. Kamensky, M.N. Features of designing a shell and tube heat exchanger / M.N. Kamensky, A.M. Kozlov // News of the Tula State University. Technical Sciences. – 2014. – No. 2. – P. 40–43.

14. Golovanchikov, A.B. Calculation of the optimal diameter of pipes, taking into account energy and resource saving / A.B. Golovanchikov, N.A. Prokhorenko // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2019. – No. 1 (26). – P. 23–28.

15. Pavlov, M.V. Determination of the optimal diameter of the heat pipe by solving the optimization problem / M.V. Pavlov, D.F. Karpov. – DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-97-103 // Environmental Engineering. – 2025. – No. 1. – P. 97–103.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 721:624.011.14.07

DOI 10.54734/20722958_2026_2_159

*Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет*

Россия, 614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29,
тел.: +7 (342) 219-80-67, +7 (342) 212-39-27

Третьякова Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительный инжиниринг
и материаловедение», доцент
E-mail: olga_wsw@mail.ru

*Уральский филиал Российской академии
живописи, ваяния и зодчества Ильи
Глазунова*

Россия, 614000, Пермский край, г. Пермь,
ул. Ленина/Комсомольский проспект, д.56/26,
тел./факс: 8 (342) 210-15-07

Пронина Вера Анатольевна,
студент
E-mail: vproninaschool61@mail.ru

*Perm National Research Polytechnic
University*

Russia, 614990, Perm Krai, Perm,
29, Komsomolsky Ave.,
tel.: +7 (342) 219-80-67, +7 (342) 212-39-27

Tretiakova Olga Victorovna,
Candidate of Sciences, Associated Professor of
the Department «Construction Engineering
and Materials Science», Associated Professor
E-mail: olga_wsw@mail.ru

*The Ilya Glazunov Russian academy of
painting, sculpture and architecture*

Russia, 614000, Perm Krai, Perm,
56/26, Lenin St./Komsomolsky Ave,
tel.: /fax: 8 (342) 210-15-07

Pronina Vera Anatolyevna,
Student
E-mail: vproninaschool61@mail.ru

ЗДАНИЯ ИЗ CLT-ПАНЕЛЕЙ: АРХИТЕКТУРНЫЕ ФОРМЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

О.В. Третьякова, В.А. Пронина

Раскрыты возможности конструкций из перекрестно-клееной древесины CLT для зданий произвольных архитектурных форм. Предложены три варианта конструктивных систем зданий в форме многогранников.

Ключевые слова: CLT-панели, перекрестно-клееная древесина, конструктивные системы, платформенные конструкции

BUILDINGS OF CLT PANELS: ARCHITECTURAL FORMS AND STRUCTURAL SYSTEMS

O.V. Tretiakova, V.A. Pronina

This article reveals the possibilities of cross-laminated timber (CLT) structures for buildings with arbitrary architectural forms. Three options for structural systems of buildings in the shape of polyhedra are proposed.

Keywords: CLT panels, cross laminated timber, structural systems, platform-type construction

Введение. Крупнопанельное строительство из древесины имеет свою историю [1]. Традиционные панели из древесины состоят из деревянного каркаса и различных

видов обшивок [2]. Здания из CLT-панелей обычно проектируются прямоугольной формы. Однако современные требования к городской среде и эксплуатационным показателям зданий приводят к поиску новых конструктивных решений. В настоящее время с появлением перекрестно-клееной древесины CLT развиваются новые тенденции в панельном домостроении. Древесина CLT как конструкционный материал имеет ряд свойств, которые выгодно отличают ее от других материалов из древесины. Это двухосная прочность и жесткость за счет взаимно перекрестного расположения слоев, а также короткие сроки строительства благодаря полной заводской готовности конструкций CLT. Преимущественно угол между взаимно перекрестными слоями обычно составляет 90 градусов. В последние годы появились конструкции панелей с диагонально ориентированными слоями и улучшенными механическими характеристиками [3]. В работе [4] представлена зависимость модуля сдвига перекрестно-клееной древесины от условий опирания конструкций и геометрии слоев. Важно, что испытания проводились с постепенным развитием повреждений, что для древесины дает более верные результаты, чем кратковременное приложение нагрузки. Взаимно перекрестное расположение слоев позволяет также повысить теплотехнические показатели материала. Вместе с тем в [5] отмечено, что дефекты склеивания могут привести к потерям тепла через панель. Кроме того, зданию из перекрестно-клееной древесины присущи такие недостатки панельного здания, как потери тепла через стыки панелей. Герметичность является одним из важнейших аспектов проектирования, влияющим на качество воздуха в помещениях, комфорт жильцов, энергопотребление и долговечность здания. Поэтому важен как контроль качества изделий на производстве, так и соответствующий подход к герметизации стыков при разработке проектных решений и производстве работ. Среди положительных показателей отмечается снижение экологических последствий производства конструкций CLT по сравнению с бетоном и другими материалами. Таким образом, благодаря преимуществам перекрестно-клееной древесины можно считать ее конкурентно способным материалом для строительных конструкций. А недостатки могут быть устранены или уменьшены конструктивными методами и контролем качества.

Формообразование зданий из панелей CLT определяются расчетно-конструктивными схемами стен, которые могут быть непрерывными по высоте, или опертыми поэтажно в зданиях платформенного типа. В работе [6] на модели обоснована возможность проектирования CLT-стен платформенного типа в шестиэтажном здании. Также разработаны нормативные рекомендации по проектированию зданий из CLT-панелей платформенного типа. В [7] даны указания по учету ветровой нагрузки в зданиях из CLT-панелей платформенного типа для включения в нормативные документы. В Техническом руководстве по проектированию и строительству высотных зданий с применением CLT-панелей для зданий платформенного типа рекомендовано проводить контроль уровня усилий в конструкциях, исходя из состояния узлов соединения стен с панелями перекрытий, а сечения конструктивных элементов назначать по расчету с учетом возможной перегрузки в стадии разрушения.

Конструкции из перекрестно-клееной древесины традиционно используются в зданиях прямоугольной формы. Здания произвольных форм являются пока перспективным направлением. Однако современные требования к городской среде и эксплуатационным показателям зданий приводят к поиску новых конструктивных решений из CLT-панелей [8]. Необходимость оптимального использования участков застройки также требует гибкого подхода к форме зданий на основе принципов архитектурной динамики [9]. Тип зданий со стенами, непрерывными по высоте, не позволяет изменять прямоугольную конфигурацию, в то время как здания платформенного типа имеют потенциальную возможность создания произвольных архитектурных форм. На сегодняшний день этот потенциал конструкций CLT не используется в полной мере. Поэтому целью работы является архитектурно-конструктивное решение здания произвольной формы из CLT-панелей. Для этого необходимо сформулировать метод формообразования на основе существующего опыта проектирования зданий платформенного типа из конструкций CLT; предложить конструктивные системы зданий многогранной формы со стенами из CLT-панелей и перекрытиями из CLT-плит.

Метод формообразования и особенности здания из конструкций CLT. В работе предлагается метод формообразования здания из чередующихся по высоте многогранных форм. В зданиях платформенного типа из CLT-панелей чередование этажей выполнено вращением вокруг вертикальной оси здания. Такой выбор не является случайным. Найдено решение, где максимально сочетаются архитектурная выразительность с выгодными механическими характеристиками и эксплуатационными показателями зданий.

Архитектурная выразительность поддерживается чередованием форм, что наделяет здание энергией движения и жизни без использования других архитектурных приемов, например, динамических фасадов. Такая форма придает зданию визуальную динамичность и создает эффект растущего дерева или распускающегося цветка, реализуя принципы архитектурной бионики [10]. Визуальный комфорт от созерцания здания близкого кругового очертания без выраженных острых углов имеет большое значение в формировании комфортной городской среды.

С позиции устойчивости и геометрической неизменяемости наиболее выгодной является треугольная форма конструкции или сооружения. Но наличие острых углов в помещении снижает показатели его эргономичности и эффективность использования внутреннего пространства помещения. Прямоугольная форма удобна для планировочных решений, но наименее устойчива и подвержена горизонтальным перемещениям узлов каркаса. В практике проектирования установлено, что с увеличением количества сторон здания его способность противостоять ветровым нагрузкам становится выше. Поэтому предложена многогранная форма здания, показанная на рис. 1-4. Конструктивный вклад перекрытий и поперечных стен в устойчивость конструкций CLT платформенного типа учтен авторами статьи при моделировании.

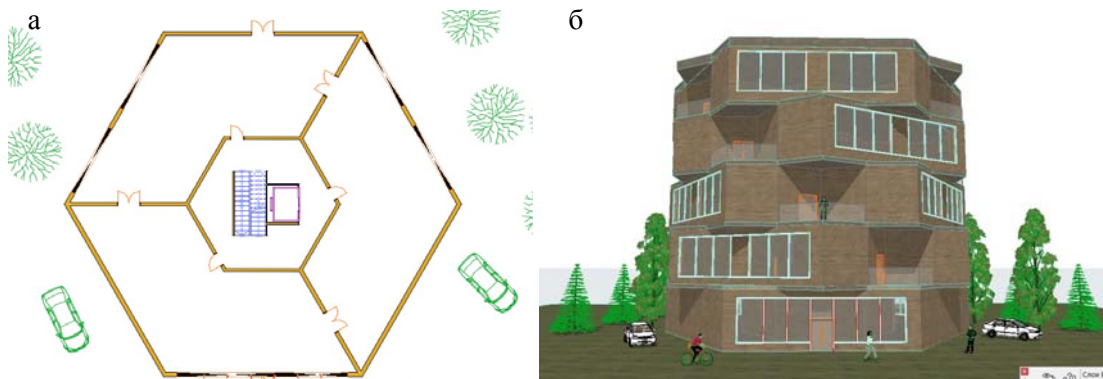


Рис. 1. Первый вариант:
а – план первого этажа; б – трехмерный фасад

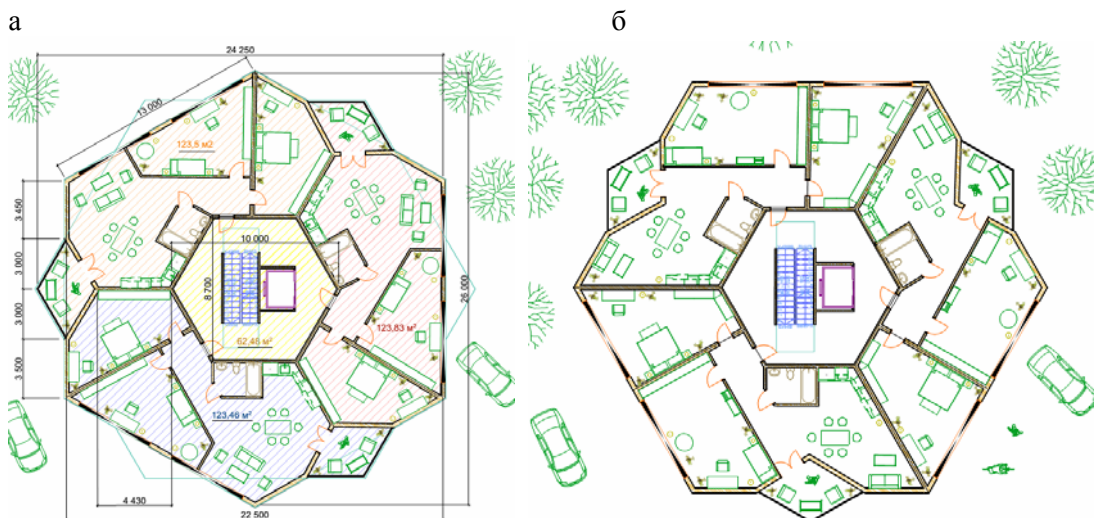


Рис. 2. Первый вариант:
а – планы второго и четвертого этажа; б – планы третьего и пятого этажа

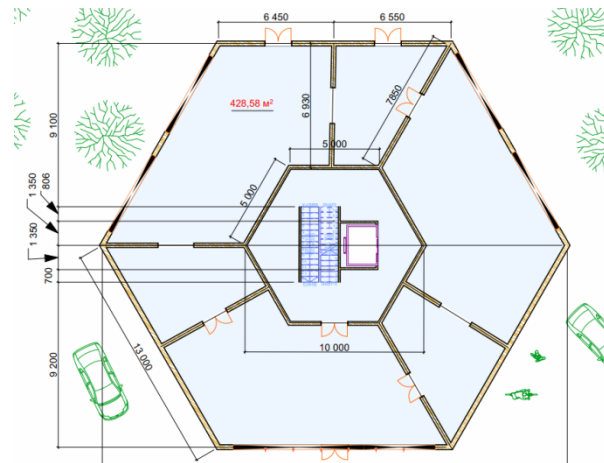


Рис. 3. Второй вариант: план первого этажа

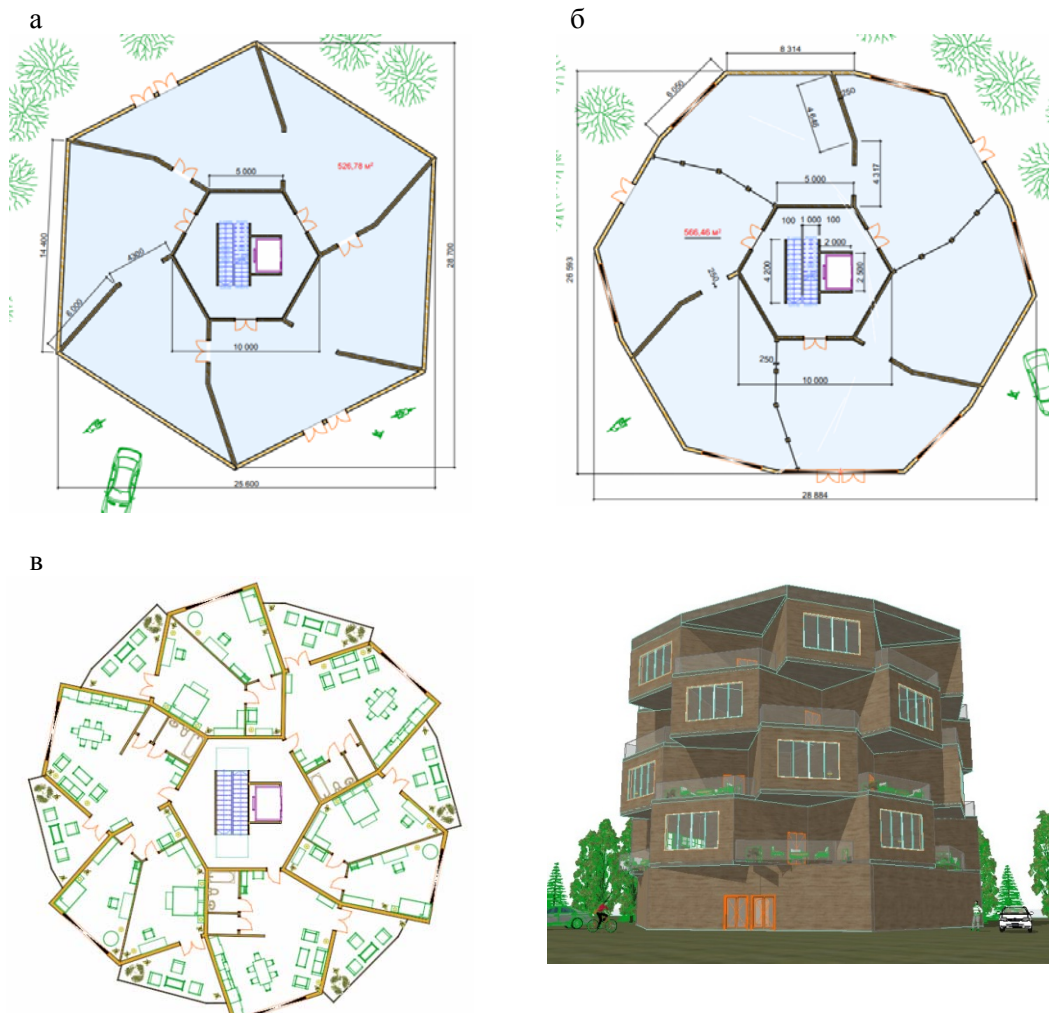


Рис. 4. Третий вариант:

а и б – варианты плана первого этажа с колоннами и стенами;
в – план второго и четвертого этажа; г – трехмерный фасад

Повышение эксплуатационных показателей зданий, предложенных конструктивных систем, заключается в первую очередь в более рациональном использовании участка застройки, в то время как прямоугольное здание является менее гибким решением в плотной городской среде. Кроме того, благодаря многогранной форме на

южной стороне можно расположить большее количество комнат, поэтому солнечный свет используется более эффективно. Многогранная форма здания близка к круглой форме, что способствует обтеканию ветром и снижению теплопотерь при отсутствии углов. Смещение этажей (поворот вокруг вертикальной оси) позволяет создать на первом и последующих этажах уютные пространства для отдыха, защищенные от атмосферных осадков.

Платформенная схема открывает возможности свободной планировки. При этом появляются участки плана здания, где расположение некоторых стен не совпадает с расположением стен на нижележащем этаже. От этого передача нагрузки от стены и перекрытия этажа приходится на CLT-плиту. Критерии прочности и приемлемости такого неравномерного нагружения перекрытий в случае несимметричного расположения стен обуславливают ограничения по пролету и толщине плит. Во избежание передачи нагрузки непосредственно на плиту перекрытия предусмотрена система балок и колонн для распределения нагрузки, как показано на рис. 4, б.

В [11] указано еще одно ограничение. CLT-панели с оконными и дверными проемами способствуют общей деформации каркаса, как и в панельном здании из других материалов. Вокруг проемов традиционно создается концентрация напряжений. В связи с этим для CLT-панелей рекомендовано расположение дополнительных анкерных креплений по краям проемов. Авторы поддерживают такое решение с последующей разработкой узлов в рабочей документации. Работу стен с проемами наиболее достоверно описывают нелинейные расчетные модели, которые в отличие от упругих моделей учитывают перераспределение напряжений. Действительно, упругие свойства, которые древесина обычно показывает при испытаниях, не отражают ее истинной работы в конструкциях при эксплуатации. Истинная работа древесины характеризуется ее длительной прочностью с учетом реологических показателей.

Результаты. В работе представлены конструктивные системы зданий платформенного типа с применением панелей и плит из древесины CLT. В таком здании перекрытие на каждом этаже используется в качестве основания (платформы) для стен следующего этажа. Таким образом, обеспечивается поэтажное опирание стен. Разработаны три варианта конструктивных систем здания платформенного типа из чередующихся по высоте многогранных форм, которые смещены относительно друг друга вращением вокруг вертикальной оси. В предложенных конструктивных системах несущие стены объединены диском перекрытий и покрытия из CLT-плит и диафрагмами жесткости, установленными в разных направлениях. Диафрагмы жесткости также запроектированы из CLT-панелей. Пространственная устойчивость здания обеспечивается совместной работой панелей стен, дисков перекрытий и покрытий, диафрагмами жесткости, а также многогранной формой здания. При горизонтальном смещении конструкций такого здания элементы, расположенные под углом к плоскости смещения, отличным от 90 градусов, будут противодействовать этому перемещению.

Первый вариант конструктивной системы – с консольными выступами перекрытий (см. рис. 1, 2). На планах показаны конструкции здания и отображены планировочные решения. Несущие стены из CLT-панелей расположены по наружному периметру здания и лестнично-лифтового холла. Диафрагмы жесткости установлены в радиальном (поперечном) направлении и объединяют несущие стены. Плиты перекрытия из древесины CLT устанавливаются в радиальном (поперечном) направлении.

Согласно планировочным решениям, на этаже размещаются три квартиры, как показано на рис. 2.

Во **втором варианте конструктивной системы** несущими являются стены из CLT-панелей по наружному периметру здания и периметру лестнично-лифтового холла, а также поперечные стены, как показано на рис. 3. Плиты перекрытия расположены в разных направлениях. Плиты на трех участках опираются на поперечные несущие стены, а в остальной части здания – на наружные стены и стены лестнично-лифтового холла.

Третий вариант конструктивной системы представлен на рис. 4. Этот вариант также имеет консольные участки перекрытий за счет смещения этажей относительно вертикальной оси. Приведены планы первого этажа с несущими стенами (рис. 4, а) и с колоннами (рис. 4, б). В случае необходимости организации свободных пространств на первом этаже предложена конструктивная схема с колоннами и балками (рис. 4, б), на которые передают нагрузку вышележащие стены. Плиты перекрытия опираются на несущие стены и балки.

Планировки и экспликация помещений показаны на рис. 5.

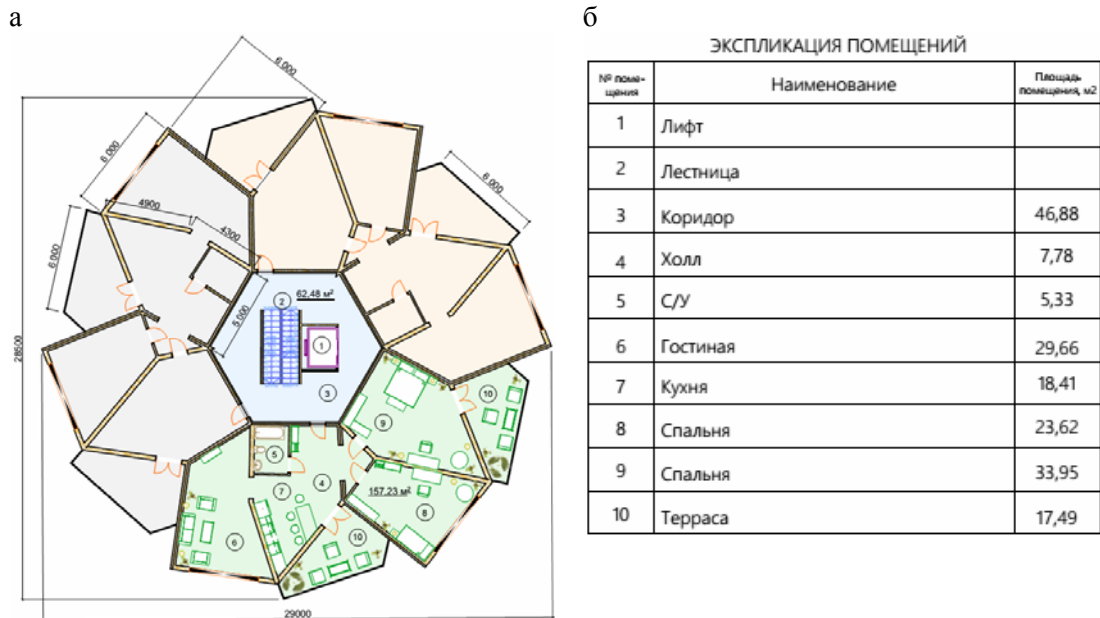


Рис. 5. Третий вариант:

а – планировки помещений (3-й и 5-й этаж); б – экспликация помещений

Обсуждение. Для зданий платформенного типа требуется совершенствовать конструкции узлов сопряжений панелей. Такой опыт представлен в ряде работ. В [12] предложено многорядное соединение деревянных конструкций на клеенных стеклопластиковых шайбах, которое пригодно для соединения конструкций CLT и снижает теплопотери, характерные для металлических креплений. Вместе с тем развитие архитектурных концепций и конструктивных решений зданий требует создания библиотек типовых узлов и разработки нормативных документов по проектированию таких зданий.

С позиции надежности в ряде работ отмечаются недостаточная объективность и неточность моделирования зданий из CLT-панелей в рамках детерминированного подхода по предельным состояниям. Ограниченное исследование пространства параметров приводит к оценке единственного набора параметров модели, которые наилучшим образом соответствуют наблюдаемым данным и ожидаемому результату. Это может привести к излишне оптимистичному результату. Тогда как вероятностные модели позволяют количественно оценить изменчивость внешних условий и свойств материалов, учесть погрешности измерений, всесторонне исследовать пространство параметров, учесть неопределенность формы модели, включить априорную информацию, обеспечивая тем самым надежность строительного объекта.

Заключение. Несмотря на то что традиционный подход к проектированию панельных зданий предусматривает прямоугольную форму в плане, произвольные архитектурные формы зданий из CLT-панелей представляют интерес для теории и практики градостроительства. Данное исследование позволило обобщить существующие знания и сделать следующие выводы.

Сформулирован метод формообразования зданий, основанный на платформенной конструктивной схеме и бионическом подходе. Платформенный тип здания из

CLT-панелей позволил выполнить их в произвольной форме с чередующимся расположением этажей. Бионический подход к конструктивным системам впервые применен к зданиям из панелей и поддерживается природой панелей из натурального материала – древесины. Учтено влияние многогранной формы и внутренних стен на устойчивость здания. Повышение эксплуатационных показателей обусловлено гибким рациональным использованием площадок строительства. Кроме того, в здании многоугольной формы использование солнечного света эффективней, чем в прямоугольном здании.

На базе этого разработаны три конструктивные системы зданий со стенами и диафрагмами жесткости из CLT-панелей, перекрытиями из CLT-плит. Этажи зданий имеют шестигранную форму и смещены относительно друг друга по высоте здания вращением вокруг его вертикальной оси, образуя консольные выступы перекрытий. Также представлен вариант с колоннами для случая, когда на первых этажах необходимы свободные от стен пространства. Предложенные конструктивные системы получены на основе традиционных принципов проектирования панельных зданий, где пространственная устойчивость обеспечивается совместной работой параллельных и взаимно перпендикулярных несущих стен, диафрагм жесткости и плит перекрытия. При этом предложенные конструктивные системы зданий в виде шестиугольной призмы, имеют повышенную устойчивость за счет увеличения числа граней (стен) и расположения стен под разными углами. Поэтому уменьшается опасность опрокидывания от внешних воздействий.

Ограничениями при проектировании зданий произвольных форм являются толщина и пролет плит на участках этажа, где стеновая панель опирается на перекрытие при отсутствии нижележащей панели. Такое опирание может быть решено с помощью дополнительных элементов в виде колонн и балок.

Направлением дальнейших исследований является численное моделирование и расчет платформенных зданий сложной конфигурации из конструкций CLT, а также вероятностный расчет надежности таких зданий.

Список литературы

1. Троегубов, И.В. Стеновые панели из древесных материалов в практике строительства / И.В. Троегубов, О.В. Третьякова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2023. – Т. 2. – С. 228–232.
2. Карпов, В.Н. Исследование пространственной работы полносборного крупнопанельного деревянного дома / В.Н. Карпов. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_115 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1(58). – С. 115–120.
3. Kurzinski, S. Investigating the Out-of-Plane Bending Stiffness Properties in Hybrid Species Diagonal-Cross-Laminated Timber Panels / S. Kurzinski, P.L. Crovella. – DOI:10.3390/app14072718 // Applied Sciences (Switzerland). – 2024. – 14(7).
4. Danielsson, H. Experimental investigation of the shear force capacity of prismatic cross laminated timber beams / H. Danielsson, T. Pazlar, E. Serrano, B. Azinović. – DOI:10.1016/j.engstruct.2024.117889 // Engineering Structures. – 2024. – 308(April).
5. Cochon, N. Towards quantifying the air leakage through cross-laminated timber / N. Cochon, R. Richman. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02748 // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – 20(June 2023). – P. e02748. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02748>.
6. Masroor, M. Validation and application of analytical design approach for multi-storey platform-type CLT shear walls / M. Masroor, T. Tannert. – DOI:10.1016/j.engstruct.2025 // Engineering Structures. – 2025. – 327(June 2024). – P. 119655.
7. Casagrande, D. An analytical matrix approach for the prediction of the elastic lateral displacements of CLT platform-type lateral load resisting systems / D. Casagrande, G. D’Arenzo, M. Masroor, I. Gavrić, G. Doudak. – DOI:10.1016/j.istruc.2024 // Structures. – 2024. – 64(December 2023). – P. 106490.

8. Zhang, X. Out-of-plane cross-angle bending stiffness of cross-laminated timber / X. Zhang, B. Niu, A. Cheng, M. Bayat, T. Tannert // *Engineering Structures*. – 2024. – 319(15). – P. 118791.
9. Архитектурная динамика при реконструкции объектов городской застройки / Х.А. Бенаи, Т.В. Радионов, Н.Н. Харьковская [и др.]. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_166 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 1(58). – С. 166–173.
10. Архитектурно-бионический подход к отображению функций и форм архитектурных объектов / А.А. Плешивцев, Е.А. Король, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин. – DOI 10.54734/20722958_2024_2_189 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 2(59). – С. 189–194.
11. Sciomenta, M. Predicting the non-linear behaviour of cross laminated timber shearwalls with cut-out openings / M. Sciomenta, R. Fanti, G. Doudak, A. Polastri, Casagrande, D.. – DOI:10.1016/j.istruc.2024.107138 // *Structures*. – 2024. – 68(June).
12. Мартышкин, Д.О. Напряженно-деформированное состояние многорядных соединений деревянных конструкций с вклеенными стеклопластиковыми шайбами / Д.О. Мартышкин. – DOI 10.54734/20722958_2025_1_141 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2025. – № 1(62). – С. 141–152.

References

1. Troegubov, I.V. Wall panels made of wood materials in construction practice / I.V. Troegubov, O.V. Tretiakova // *Modern technologies in construction. Theory and practice*. – 2023. – Vol. 2. – P. 228–232.
2. Karpov V.N. Studing spatial work of a fully prefabricated large panel wooden house / V.N. Karpov. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_115 // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – No 1(58). – P. 115–120.
3. Kurzinski, S. Investigating the Out-of-Plane Bending Stiffness Properties in Hybrid Species Diagonal-Cross-Laminated Timber Panels / S. Kurzinski, P.L. Crovella. – DOI:10.3390/app14072718 // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2024. – 14(7).
4. Danielsson, H. Experimental investigation of the shear force capacity of prismatic cross laminated timber beams / H. Danielsson, T. Pazlar, E. Serrano, B. Azinović. – DOI:10.1016/j.engstruct.2024.117889 // *Engineering Structures*. – 2024. – 308(April).
5. Cochon, N. Towards quantifying the air leakage through cross-laminated timber / N. Cochon, R. Richman. – DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02748 // *Case Studies in Construction Materials*. – 2024. – 20(June 2023). – P. e02748. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02748>.
6. Masroor, M. Validation and application of analytical design approach for multi-storey platform-type CLT shear walls / M. Masroor, T. Tannert. – DOI:10.1016/j.engstruct.2025 // *Engineering Structures*. – 2025. – 327(June 2024). – P. 119655.
7. Casagrande, D. An analytical matrix approach for the prediction of the elastic lateral displacements of CLT platform-type lateral load resisting systems / D. Casagrande, G. D'Arenzo, M. Masroor, I. Gavrić, G. Doudak. – DOI:10.1016/j.istruc.2024 // *Structures*. – 2024. – 64(December 2023). – P. 106490.
8. Zhang, X. Out-of-plane cross-angle bending stiffness of cross-laminated timber / X. Zhang, B. Niu, A. Cheng, M. Bayat, T. Tannert // *Engineering Structures*. – 2024. – 319(15). – P. 118791.
9. Architectural dynamics with reconstruction of urban development's / H.A. Benai, T.V. Radionov, N.N. Har'kovskaja [et al.]. – DOI 10.54734/20722958_2024_1_166 // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – No 1(58). – P. 166–173.
10. Architectural and bionic approach to displaying functions and forms of architectural objects / A.A. Pleshivcev, E.A. Korol', L.S. Sabitov, I.N. Gar'kin. – DOI 10.54734/20722958_2024_2_189 // *Regional architecture and engineering*. – 2024. – No 2(59). – P. 189–194.

11. Sciomenta, M. Predicting the non-linear behaviour of cross laminated timber shearwalls with cut-out openings / M. Sciomenta, R. Fanti, G. Doudak, A. Polastri, Casagrande, D.. – DOI:10.1016/j.istruc.2024.107138 // Structures. – 2024. – 68(June).

12. Martyshkin, D.O. Stress-strain state of joints on glued fiberglass washers / D.O. Martyshkin. – DOI 10.54734/20722958_2025_1_141 // Regional architecture and engineering. – 2025. – № 1(62). – P. 141–152.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Лапшина Елена Геннадьевна,
кандидат архитектуры, профессор,
зав. кафедрой «Основы архитектурного
проектирования»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Ефимова Татьяна Борисовна,
старший преподаватель кафедры «Основы
архитектурного проектирования»
E-mail: ef@yandex.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Lapshina Elena Gennadyevna,
Candidate of Science in Architecture,
Professor, Head of the department
«Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: elenlaps@mail.ru

Efimova Tatyana Borisovna,
Senior lecturer of the department
«Fundamentals of Architectural Design»
E-mail: ef@yandex.ru

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВЕТСКИХ ПАРКОВ

Е.Г. Лапшина, Т.Б. Ефимова

Описана архитектура парков культуры и отдыха, созданных в нашей стране в советское время. Прежде всего рассмотрены условия, которые привели к необходимости создания советских парков, а также предпосылки появления парков как особенных озелененных территорий в городе, сооружений ландшафтной архитектуры. Показано образование и развитие новых форм городского отдыха. Изучены системообразующие элементы советского парка, их функциональное наполнение. Отмечены закономерности развития пространства городских парков советского периода, имеющие влияние на их современное состояние.

Ключевые слова: архитектурно-планировочное решение, городское озеленение, парк культуры и отдыха, историческое развитие, социокультурное пространство

ARCHITECTURAL AND PLANNING FEATURES OF SOVIET PARKS

E.G. Lapshina, T.B. Efimova

The architecture of cultural and recreation parks created in our country in Soviet times is described. First of all, the conditions that has led to the need to create Soviet parks, as well as the prerequisites for the emergence of parks as special green areas in the city and landscape architecture structures, are considered. The formation and development of new forms of urban recreation are shown. The system-forming elements of the Soviet park and their functional content have been studied. The patterns of development the space of city parks of the Soviet period, which have an impact on their current state, are noted.

Keywords: architectural and planning solution, urban landscaping, recreation park, historical development, socio-cultural space

Для понимания функционального назначения советского парка рассмотрим образ жизни людей, для которых он предназначался, определим, чем быт советского человека стал отличаться от векового уклада.

Веками люди жили на земле и от нее кормились. Это сформировало основы крестьянского быта. В нем, как правило, не было свободного времени для отдыха. Крестьяне, а это основное население страны, не работали только по праздникам. Однако во второй половине 19-го в. вместе с промышленной революцией произошли глобальные изменения. Развиваются заводы и фабрики, люди из деревень переселяются в города. Попадают в другую среду, становятся рабочими, у которых фиксированное рабочее время (10-12 часов) и оплата труда.

В советской стране для рабочего населения сохраняются установленный рабочий день (8 часов), что ведет к появлению свободного времени, и фиксированная оплата труда. Для организации отдыха в свободное от работы время начинают использоваться парки культуры и отдыха. Это новый тип парка. Он отличается от публичных

дореволюционных парков, предлагая не только прогулки и различные увеселения, аттракционы, но и программы мероприятий, связанных с политико-просветительской работой, для культурного роста и развития рабочего человека.

В XX веке по всему миру стремительно растут промышленные города. В городе ощущается нехватка зеленых зон, городских садов и парков для публичного использования. Сначала это были, как правило, частные парки – дворянские, императорские. Такие зеленые территории усадеб для массового отдыха не подходили. В дореволюционный период Москва имела 3 публичных, общедоступных парка: Сокольники, Воробьевы горы, Петровский парк (современное Динамо). Начинает зарождаться массовая культура рабочего класса в противовес элитарной культуре дворян. Массовые гуляния устраиваются для разнообразной публики. Устроители заинтересованы получать деньги, а публика предпочитает простые, быстрые, эффектные и дешевые развлечения – это аттракционы, довольно примитивные. В начале XX века появляется кинематограф.

Один из первых декретов советской власти устанавливал 8-часовой рабочий день и 6-дневную неделю. Появляются отпуска, больничный, декретный отпуск (в 1920-30-е гг. он составлял 4 месяца). В Советской Конституции записано, что граждане СССР имеют право на отдых.

У советского государства была главная цель – построение коммунизма. Для достижения требовалось в первую очередь изменить мышление людей. В стране после 1920-х гг. начинаются индустриализация и коллективизация. Однако советская власть уделяет внимание не только развитию промышленности, но и созданию нового образа жизни людей, воспитанию советского человека. Параллельно с индустриализацией в СССР происходит культурная революция. Создаются учреждения новой культуры быта, где политико-просветительская работа сочетается с культурным отдыхом.

Большое внимание уделяется созданию парков культуры и отдыха на озелененных территориях города. Рассмотрим, как были реализованы советские парки. Хотя парки аттракционов, развлечений существовали ранее, советская власть решила создать нечто принципиально новое. В 1928 году Моссовет принимает решение о создании *первого в стране парка культуры и отдыха*. Им стал парк им. Горького в Москве, который был разбит на месте Всесоюзной сельскохозяйственной выставки на Крымском Валу (рис. 1).

ВСХВ 1923 г.



Рис. 1. Всесоюзная сельскохозяйственная выставка (Москва, Крымский Вал, 1923 г.)

На территории парка изначально располагался ряд павильонов, сохранившихся от выставки, например павильон «Махорка» архитектора К. Мельникова и павильон машиностроения архитектора И. Жолтовского. Проекта планировки парка не существовало. Создание парка было поручено Луначарскому. Первый парк культуры и отдыха открылся в 1928 году, еще не будучи полностью построен (рис. 2). На открытие парка пришли около 300 тыс. человек.



Рис. 2. Первый советский парк культуры и отдыха им. Горького (Москва. 12 августа 1928 г.)

Первый парк проработал всего один месяц, так как был разгромлен – создавались огромные очереди, клумбы были затоптаны, инвентарь поломан и т.д. Однако власти увидели, что людям интересно собираться для отдыха в предназначенном для этого месте, за месяц парк посетило около 1 млн чел. Приняли решение – эксперимент продолжать. Парк им. Горького откроется далее в 1929 г., вслед за ним будут разбиты парки культуры и отдыха в Ленинграде и других городах Советского Союза (рис. 3).

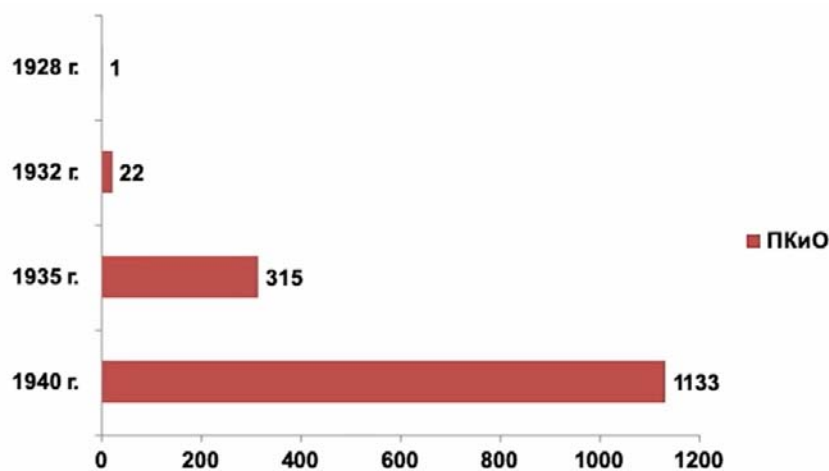


Рис. 3. Статистика роста числа советских парков в СССР в 1928-1940 гг.

В стране до войны было построено более 1 тыс. парков. В современной России осталось 317 парков культуры и отдыха.

Рассмотрим *причины популярности* советских парков. Целью создания парка для власти было организовать активный отдых трудящихся, способствовать воспитанию советского человека [1]. Советская власть хотела получить отдачу от парков культуры и отдыха в области образования, воспитания, физической подготовки, а также предполагалась пропаганда и агитация за новый образ жизни. Поскольку в стране проходила индустриализация, нужны были квалифицированные специалисты, уровень образования людей надо было поднимать. Воспитание нового человека в условиях отдыха предполагалось сделать более эффективным. Физическая подготовка была связана с военным делом. Пропаганда идеалов мышления также являлась важной частью работы сотрудников парка.

На первом этапе не было четкой концепции советского парка. Это одна проблема. Была и вторая проблема – не было кадров, способных вести массовую работу. Общественно полезное дело часто поручалось работникам предприятий. Однако далее штатный состав работников парка возрос, появилась необходимость строить для них в парке общежития.

Рассмотрим *запросы посетителей парка*: кто приходил в парк, зачем, какие идеи до него пытались донести. Ключевое слово здесь «новый» – новый советский человек, для него новый быт, новая жизнь, новый мир, новая культура. Слово «масса» также важно, поскольку коммунизм подразумевал коллективизм, индивидуальность осуждалась. Проводились массовые мероприятия. Пропаганда также была внедрена в работу парка, она связывалась с различными сторонами отдыха, например с пропагандой здорового образа жизни. Большое значение имел актив – это человек или группа людей, которые добровольно помогали в работе парка на массовых мероприятиях. Массовое хоровое пение было очень распространено.

Схема типового парка представлена на рис. 4. Он состоял из партера, как в театре, и прогулочных зеленых зон. Партер, или зона, прилегающая к главному входу с парадной аркой, могла включать театры и кинозалы, лектории и спортплощадки и т.д.



Рис. 4. Функциональная схема типового советского парка

Если прогулочные зоны занимали огромные площади, контролировать их было невозможно. Поэтому все активности сосредоточивались в зоне партера, посещение парка стало платным.

Оформление парка соответствовало задачам воспитания советского человека. Это выразилось как в архитектуре входных групп, так и в малых архитектурных формах (лавочки, урны, скульптура). Все это, по замыслу создателей парка, должно было воспитывать отдыхающих. В парке всегда проходили перформансы, направленные на пропаганду коллективизации и советского образа жизни.

Сегодня поход в парк реализует потребность в прогулках, в смене обстановки, в посещении аттракционов. Каждый преследует свою цель в процессе активного отдыха. В советском парке такой досуг считался пустым, а он должен был быть полезным, человек обязан развиваться физически, интеллектуально, культурно. Так, воспитательная работа в парке связывалась с появлением в парке аллеи ударников, где давалась информация о передовиках производства. Это могло быть воплощено в виде скульптуры – бюст героя на постаменте (рис. 5, а). Были также аллеи прогульчиков (рис. 5, б), где располагались сатирические картины, скульптурные группы.

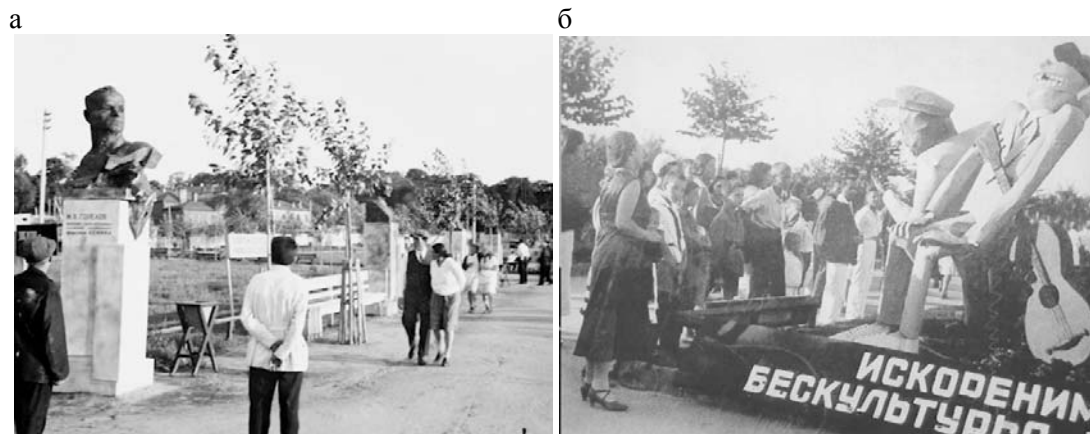


Рис. 5. Благоустройство и перфомансы советского парка:
а – аллея передовиков производства; б – аллея прогульчиков

Скульптуры не всегда могли занять достойное место в парке. Примером служит известная работа Ивана Шадра «Девушка с веслом» (рис.6,а). Она была изготовлена в 1935 году и установлена в центре фонтана в партерной зоне парка им. Горького в Москве. Но в том же году комиссия, посетившая парк, указала убрать скульптуру, как не являющуюся символом Советской страны. В 1937 году Шадр изготовил другой вариант скульптуры (рис. 6, б), но девушка с веслом также была изображена обнаженной. Скульптура простояла до войны 1941 г. Осталась в истории третья скульптура девушки с веслом, которую выаял Р.Йотка, он представил девушку спортсменкой, одетой в шорты и майку (рис.6, в). Этот образ отличался от античного образца скульптуры, однако стал советским каноничным образцом, копии скульптуры разойдутся по паркам всего Советского Союза.

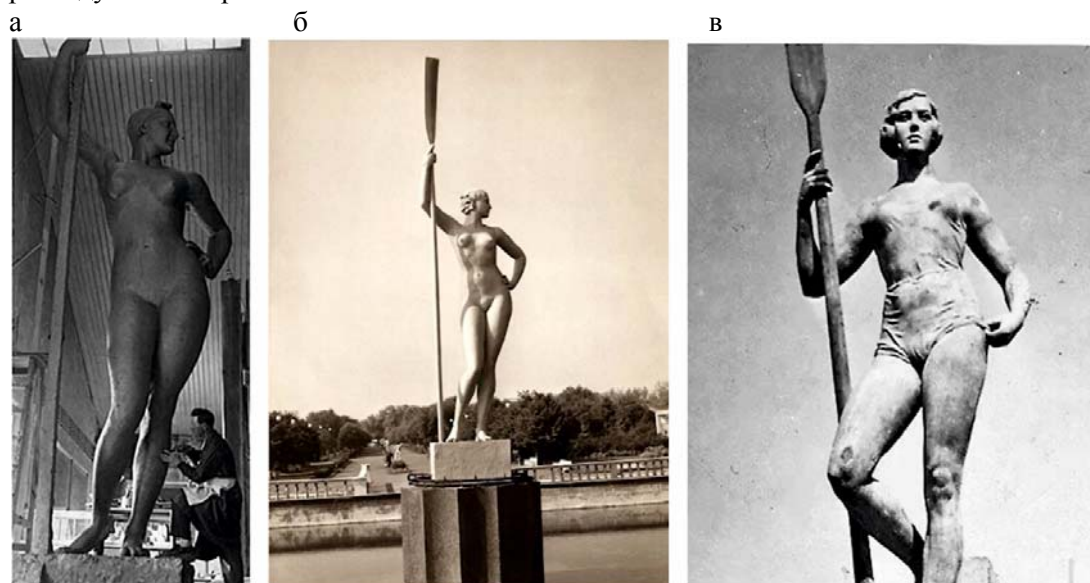


Рис. 6. Скульптура для парка «Девушка с веслом»:
а, б – автор И.Шадр; в – автор Р.Йотка

Территорию парка порой украшали изображения советских лидеров. Примером является оригинальная клумба, где портреты вождей выполнены из цветов (рис. 7).



Рис. 7. Советский парк украшен портретами лидеров страны Ленина и Сталина

Тематические зоны парка предназначались для выполнения разработанных программ мероприятий. Основные мероприятия были массовыми – это митинги, где озвучивались важные идеи. Проводились спортивные мероприятия, где пропагандировался активный образ жизни. Для проведения зарядки использовались большие зарядки спортивные площадки. Для плавания сооружались мостки на реке Москве. Для катания на горках выстраивали санные трамплины, пример такого сооружения – на Воробьевых горах в Москве (рис. 8).



Рис. 8. Горка для катания на санях. Москва, Воробьевы горы. 1934 г.

Для пропаганды развития науки и техники в парках сооружали павильоны, где проводились консультации, например по дирижаблестроению. Сооружались также городки науки и техники, посвященные физике, химии, биологии и пр. На открытых площадках проводилась политинформация на актуальную тему (рис. 9).



Рис. 9. Открытый лекторий в парке

Особое внимание уделялось детям. В каждом парке действовали городки или базы пионеров и школьников (рис. 10), а также могли находиться ясли, детсады, посещение которых было платным. Это был особый парк в парке.



Рис. 10. Детский городок в советском парке

Главным развлечением почти в каждом парке стала парашютная вышка (рис. 11, а). Были и другие экстремальные развлечения (рис. 11, б).

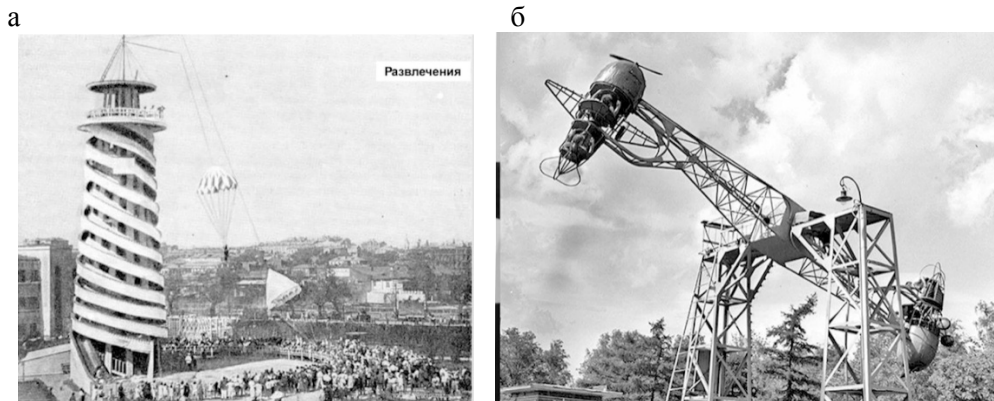


Рис. 11. Парашютная вышка и аттракцион «Петля Нестерова» в парке им.Горького (Москва, 1930 г.)

Аттракционы также пытались превратить в обучающие точки. Например, лабиринт мог содержать лозунги на каждой двери, выйти из него можно, если выберешь правильный лозунг. В любом парке находились и традиционные качели, карусели. Были популярны театральные площадки (рис. 12, а), библиотеки и избы-читальни, солярии и городки однодневного отдыха (небольшой санаторий), набережные для прогулок и мостки для прыжков воду (рис. 12, б).

а



б



Рис. 12. Площадки для концертов (а), набережные для прогулок (б)

Парки быстро набирали популярность. Они стали своеобразной витриной советской жизни. Это была «фабрика счастливых людей», как называл ее писатель Герберт Уэллс. Здесь люди отдыхали и веселились. Советская культура менялась, менялись и советские парки. Не все идеи, задуманные властью, прижились в парке. К концу 1930-х годов эксперименты в советских парках завершились. Со временем закончились и обсуждения в печати вопроса о парке как о клубе для освоения «природной культуры» [2]. Желание людей отдыхать и развлекаться возобладавало над прочими концепциями. Советский парк получил двойственный образ. С одной стороны, в парках проводились массовые действия по праздникам, например 1 мая и

7 ноября со знаменами, лозунгами, плакатами. С другой стороны, в послевоенное время в парках работают аттракционы для развлечений, проходят свадебные мероприятия и другие семейные праздники.

Поскольку отдых горожан организован в парках на озелененных территориях, проанализируем, как озеленение городов осуществлялось после Великой Отечественной войны. По указу Правительства в послевоенный период началось восстановление не только разрушенных промышленных предприятий, жилых домов, общественных зданий, но и территорий, занятых зелеными насаждениями. Только за период 1945–1946 годов в городах РСФСР было высажено 6,4 млн деревьев и 7,5 млн кустарников [3, 4]. Советский город должен был гармонично смягчить территориальную отдаленность городского жителя от природной среды, дать человеку окружение из зеленых насаждений для отдыха после рабочего дня, снизить контрастность между городской застройкой и живой природой. В период 1950-х годов научно-исследовательские институты начали интенсивную работу по обоснованию норм озеленения в городах.

Новая форма для ПКиО, обеспечивающая разнообразие в обслуживании масс посетителей парка, требовала и нового подхода к композиционным приемам озелененных территорий. Применялось два основных композиционных приема: 1) для территорий массового использования – геометрическая планировка, организованная в композиции с сооружениями социалистической тематики; 2) для прогулочных территорий – принцип свободной пейзажной планировки с учетом массовых посещений [5].

В целом система озелененных территорий крупного города должна была состоять из крупных общегородских парковых массивов, к которым добавляются меньшие по площади районные парки, сады, связанные между собой зелеными артериями — полосами скверов, бульваров и набережных. В дополнение к основному озеленению развивалась сеть малого зеленого строительства: архитектурно-декоративные элементы, увязанные с ансамблями улиц, площадей, водных поверхностей, жилых и промышленных кварталов, отдельных зданий, а также защитное и специальное озеленение для территории больниц, зоологические и ботанические парки.

В 1970-е годы паркам было отведено особое значение. Подчеркивалась необходимость сохранения озелененных территорий. Так называемая «зеленая» архитектура должна была оставаться полноправным элементом городского пространства. Для решения задач озеленения городов были необходимы кадры, поэтому на рубеже 1960-70-х годов по инициативе Л.С. Залесской в Московском архитектурном институте впервые создается кафедра «Ландшафтная архитектура», также ею при Московской организации Союза архитекторов была создана секция «Озеленение», которая затем названа Объединением ландшафтных архитекторов Москвы, а сегодня – это Ассоциация ландшафтных архитекторов стран СНГ.

Отметим в завершение, что кроме советских концепций и подходов, в парках находилось место и субкультурам. Например, в 1950-60-е годы в них устраивались концерты стиляг, затем панков и т.д. Со временем идеологическая составляющая парка постепенно уходила, а развлекательно-досуговая сохранилась. Планировка современных парков также во многом осталась той, какой была заложена в советский период. Она включает функциональное зонирование, архитектуру малых форм, павильонов, фонтанов, цветников и зеленых площадок.

В качестве примера назовем парки культуры и отдыха города Пензы [6, 7, 8]. Центральный ПКиО им. В.Г. Белинского был создан на базе публичного парка имперских времен, который назывался тогда «Верхнее гуляние». В Заводском районе после Великой Отечественной войны был разбит Комсомольский парк. Жилой район Арбеково в 1970-е годы получил высаженный и обустроенный парк им. Ульяновых (рис. 13, а, б, в).

а



б



в



Рис. 13. Парки советского периода города Пензы:
а – ЦПКиО им.Белинского; б – ПКиО «Комсомольский»; в – ПКиО им.Ульяновых

Таким образом, были рассмотрены развитие парков в советское время, их связь с более ранним историческим этапом и особенности распространения советской культуры. Выделена основная цель советского парка – идеологически-просветительская, дополняющая культурно-развлекательную программу ПКиО. Отмечено важное значение озеленения территорий, предназначенных для массового отдыха населения в горо-

дах. Приведены примеры советских парков, показано их функциональное зонирование. Отмечены такие закономерности развития архитектурного пространства городских парков советского периода, как выработка системы специализированных зон для активного отдыха и массовых действий, озелененных территорий и набережных для оздоровления и занятия спортом. Подчеркнута необходимость наращивания зеленых территорий для создания экологически чистой среды крупного города.

Список литературы

1. История дизайна: советские парки. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ffnFtAyJFE>
2. Голбин, А.Ю. «Культурная революция»: становление системы парков культуры и отдыха в СССР 1928–1941 гг. / А.Ю. Голбин. – DOI: 10.28995/2073-6355-2018-5-27-36 // Вестник РГГУ. Серия «История. Филология. Культурология. Востоковедение». – 2018. – № 5(38). – С. 27–36.
3. Залеская, Л.С. Ландшафтная архитектура / Л.С. Залеская, Е.М. Микулина. – Москва, 1979. – 240 с.
4. Лунц, Л.Б. Городское зеленое строительство / Л.Б. Лунц. – Москва : Стройиздат, 1974. – 275 с.
5. Вергунов, А.П. Архитектурная композиция садов и парков / А.П. Вергунов. – Москва : Стройиздат, 1980. – 254 с.
6. Парк культуры и отдыха им. В.Г. Белинского // Пензенская энциклопедия. – Москва : Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 2001. – С.433.
7. Лапшина, Е.Г. Трансформация общественных пространств в системе субцентров крупного города: Западный жилой район Пензы / Е.Г. Лапшина, Н.С. Усанов // Региональная архитектура и строительство. – 2026. – №1. – С.154–164.
8. Ефимова, Т.Б. Система зеленых пространств как экологический каркас города Пензы / Т.Б. Ефимова // АМИТ. – 2023. – №3(64). – С.233–246.

References

1. Design history: Soviet park. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ffnFtAyJFE>
2. Golbin, A.Y. «Cultural Revolution»: the formation of the system of parks of culture and recreation in the USSR in 1928-1941 / A.Y. Golbin. – DOI: 10.28995/2073-6355-2018-5-27-36 // Bulletin of the Russian State State University. The series «History. Philology. Cultural studies. Oriental Studies». – 2018. – No. 5(38). – P. 27–36.
3. Zalesskaya, L.S. Landscape architecture / L.S. Zalesskaya, E.M. Mikulina. – Moscow, 1979. – 240 p.
4. Lunts, L.B. Urban green construction / L.B. Lunts. – Moscow : Stroyizdat, 1974. – 275 p.
5. Vergunov, A.P. Architectural composition of gardens and parks / A.P. Vergunov. – Moscow : Stroyizdat, 1980. – 254 p.
6. Park of Culture and Leisure named after V.G.Belinsky // Penza Encyclopedia. – Moscow : Scientific publishing house “Big Russian Encyclopedia”, 2001. – P.433.
7. Lapshina, E.G. Transformation of public spaces in the system of a large city subcenters: Western residential area in Penza / E.G. Lapshina, N.S. Usanov // Regional architecture and engineering. – 2026. – №1. – P.154–164.
8. Efimova, T.B. The system of green spaces as an ecological framework of Penza city / T.B. Efimova // AMIT. – 2023. – №3(64). – P.233–246.

УДК 728:711.168

DOI 10.54734/20722958_2026_2_179

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Дерина Мария Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Петрянина Любовь Николаевна,
доцент кафедры «Городское строительство
и архитектура»
E-mail: gsia@pguas.ru

Исаметдинов Сергей Анатольевич,
магистрант
E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Derina Maria Aleksandrovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Urban Construction and
Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Petryanina Lyubov Nikolaevna,
Associate Professor of the Department «Urban
Construction and Architecture»
E-mail: gsia@pguas.ru

Isametdinov Sergey Anatolyevich,
Master
E-mail: gsia@pguas.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ: АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА И РАЗРАБОТКА ОБЪЁМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, С.А. Исаметдинов

Исследована целесообразность капитального ремонта и реконструкции городской застройки, как альтернатива новому строительству. Показано влияние существующих конструктивных схем на трансформацию объемно-планировочного решения, сохранение основных конструктивных элементов здания, уровень благоустройства и инженерного обеспечения. Описаны последовательность перепланировки и этапы разработки объемно-планировочных решений. Проведен анализ ключевых нормативных актов, определяющих порядок выполнения обследований технического состояния зданий и оценки степени физического износа их конструктивных элементов. Сформулирован методологический подход и установлены критерии для определения физического износа отдельных конструкций и здания в целом с учетом стоимости ремонтно-восстановительных работ.

Ключевые слова: городская застройка, здание, объемно-планировочное решение, техническое состояние, физический износ, обследование, капитальный ремонт, реконструкция

URBAN DETERIORATION RECONSTRUCTION OPTIMIZATION: PHYSICAL ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF SPATIAL PLANNING SOLUTIONS

M.A. Derina, L.N. Petryanina, S.A. Isametdinov

This article analyzes the feasibility of major renovations and reconstruction of urban development as an alternative to new construction. It examines the impact of existing design schemes on the transformation of the space-planning solution, the preservation of the building's key structural elements, and the level of landscaping and utility services. The redevelopment sequence and stages of space-planning solution development are outlined. An analysis of key regulations governing the procedure for conducting technical inspections of buildings and assessing the degree of physical deterioration of their structural elements is provided. A methodological approach is formulated and

criteria are established for determining the physical deterioration of individual structures and the building as a whole, taking into account the cost of repair and restoration work.

Keywords: urban development, building, space-planning solution, technical condition, physical deterioration, survey, major repairs, reconstruction

В настоящее время вскрылись определенные недостатки быстрых темпов городского строительства в России до конца 1980-х годов, связанные с временными ограничениями и дефицитным финансовым обеспечением. Одним из рациональных путей решения данной проблемы представляется капитальный ремонт или реконструкция существующих зданий. Это процесс, включающий в себя общую оценку технического состояния объекта, определение степени его повреждения и последующее проведение ремонтно-восстановительных мероприятий, направленных на восстановление, функциональную трансформацию и обеспечение безопасной эксплуатации городских объектов жилищно-коммунального комплекса.

Поэтому исследование направлено на оценку целесообразности проведения комплексного капитального ремонта или реконструкции существующих зданий, представляющих собой актуальную альтернативу новому строительству, т.к. модификация объемно-планировочных и конструктивных решений позволяет существенно снизить физический и моральный износ, улучшить инженерное оснащение зданий, сохраняя при этом исторически сложившийся облик и структуру городской застройки (рис. 1).

В рассмотренных архитектурно-строительных проектах реконструкции, эксплуатации и ремонта жилого фонда и общественных центров выявлена разная степень проработки комплексных решений, которые затрагивают архитектурные и градостроительные аспекты, вопросы энергоэффективности и энергосбережения, технического обслуживания, санитарной очистки, технологического обеспечения и организации ремонтно-строительных работ (рис.2).

Определено, что при системном проектировании капитального ремонта и реконструкции зданий создается комплексная комфортная среда, а не только физический объект. Показатели комфорта в реконструируемых зданиях закладываются, как показал анализ, на уровне действующих нормативных требований. Однако некоторые показатели (размеры помещений, конструктивно-планировочный остов здания и др.) уже соответствуют действующим нормативам, а иногда и перспективным показателям (рис. 3).

Очевидным при изучении состояния технической эксплуатации городских строительных объектов стал факт снижения объемов финансирования на диагностические мероприятия (осмотры, обследования) и регламентные ремонтные работы, что в перспективе неизбежно повлечет за собой дальнейшее нарастание физического износа зданий (рис. 4).

Рассмотрение проектной документации по реконструкции и капитальному ремонту зданий городской застройки включало в себя первоначальное ознакомление с представленными графическими и текстовыми материалами, показавшими решения разного уровня архитектурных, конструктивных, экономических и прочих задач, на основании чего было установлено, что для максимального сохранения существующих конструкций и планировок, оптимальным является перспективное проектирование концептуальных решений. Такой подход позволит сократить расходы на усиление несущих конструкций до 50 % и избежать будущих перепланировок. Уровень комфорта при реконструкции должен определяться на основе прогнозируемых показателей планировки, благоустройства и инженерных систем. Объем работ, влияющих на перепланировку, может значительно варьироваться в зависимости от градостроительных и технических условий.



Рис. 1. Фрагменты реконструкции и капитального ремонта зданий и территорий по ул. Центральной и ул. Кирова в г. Пензе



Рис. 2. Примеры рассмотренных проектных предложений капитального ремонта отдельных зданий и реконструкции городской среды



Рис. 3. Примеры преобразования объемно-планировочных решений в условиях реконструкции



Рис. 4. Фрагменты фасадов зданий городской застройки, имеющих значительный физический износ

Применение типовых конструктивных схем нового строительства в реконструируемых зданиях (в процессе перепланировки) ставит особую задачу – сохранение полезной жилой площади, для решения которой предлагаются следующие подходы:

– существующие стены могут быть трансформированы; возможны варианты их разделения на секции, включающие лестничные клетки (существующие и вновь запроектированные), или на отдельные жилые ячейки, которые могут быть разделены на основную зону и вспомогательную, предназначенную для размещения инженерных систем. Такая методика стала основой для разработки алгоритма оптимизации перепланировки при реконструкции (рис. 5);

– в отличие от нового строительства, где часто соблюдаются строгие модульные параметры, реконструкция предоставляет большую свободу в разработке планировочных решений, что позволяет учитывать индивидуальные требования к проекту и создавать более вариативные пространства.

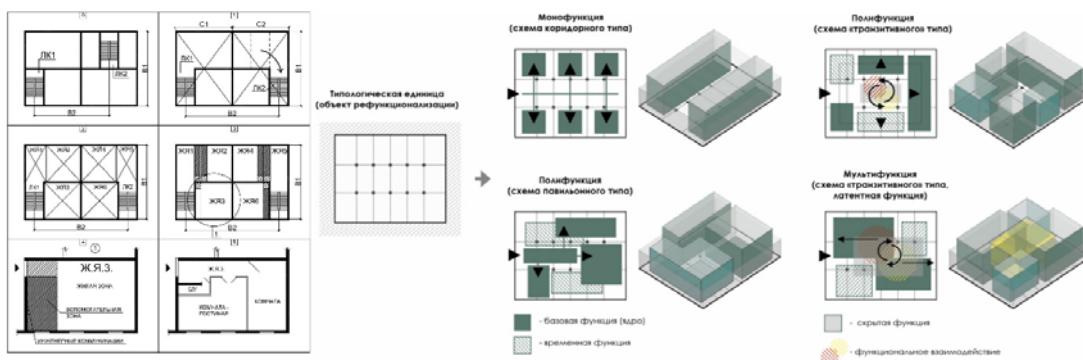


Рис. 5. Этапы оптимизации планировочного решения

Целесообразность капитального ремонта и реконструкции зданий сложившейся городской застройки подтверждена проектным и опытным путем, при этом определены объем и последовательность работ, для чего разработан и упорядочен

процесс выбора оптимального объемно-планировочного и конструктивного решений, включающий следующее:

- выбор варианта перепланировки;
- создание функциональной схемы и разработку объемно-планировочного решения;
- согласование объемно-планировочного и конструктивного решений;
- определение условий эксплуатации здания и работы обслуживающих служб;
- расчет технико-экономических показателей выбранного варианта перепланировки;
- использование программных средств для оптимизации процесса реконструкции путем разработки различных вариантов перепланировки.

При детальном изучении проектно-сметной документации, особенно касающейся реконструкции жилых зданий, были выявлены два ключевых подхода к перепланировке, которая может быть частичной и полной. Выбор между этими вариантами определяется степенью физического и морального износа строения, а также уровнем его благоустройства, оцениваемым на предмет соответствия актуальным нормативным требованиям.

Частичная перепланировка применима, когда требуется изменить только часть помещений, обеспечив их всеми необходимыми коммуникациями. Она подходит в следующих ситуациях:

- здание в хорошем состоянии: если существующая планировка и конструктивное решение в основном соответствуют современным нормам, и требуются лишь незначительные изменения, что характерно для относительно новых зданий, где износ стен не превышает 35 %;
- изменение конфигурации комнат: если планируется объединить или разделить существующие помещения, перемещая перегородки. При этом новые помещения должны быть функционально обоснованы, соответствовать зонированию и иметь все необходимые коммуникации и оборудование; износ стен в этом случае также не должен превышать 35 %;
- ограничения для полной перепланировки: если стены здания имеют износ более 50 % и срок его дальнейшей службы невелик, полная перепланировка будет нецелесообразной.

Полная перепланировка предполагает комплексное изменение объемно-планировочного решения здания с установкой нового инженерного оборудования, соответствующего актуальным нормам. Такой подход оправдан, когда:

- физический износ стен минимален: не превышает 35 %, а перекрытия находятся в удовлетворительном состоянии или требуют лишь частичной замены;
- масштабные изменения: при полной перепланировке возможно изменение расположения лестниц, функциональных зон на этаже, а также добавление новых конструктивных элементов (например, армированных поясов, стен, опор); такие меры позволяют создать помещения, отвечающие современным, а иногда и будущим требованиям, с высоким уровнем комфорта.

Неблагоприятная экономическая ситуация в стране, одновременно с плановыми работами по капитальному ремонту и реконструкции, стимулирует появление на рынке недвижимости новых объектов, чье техническое состояние часто не соответствует запрашиваемой цене. В связи с этим, для принятия взвешенного решения о приобретении недвижимости требуется предварительная оценка предполагаемых затрат на ремонт и восстановление. При высоком уровне физического износа объекта, также необходимо определить, насколько целесообразно проведение восстановительных мероприятий уже при разработке вариантов реконструкции или капитального ремонта зданий и сооружений, находящихся в эксплуатации длительное время.

Во всех вышеперечисленных случаях были определены главные средства для сбора первичной информации, служащие основой для принятия решения: всестороннее исследование технического состояния объекта, выявление степени его физического старения и последующий технико-экономический анализ.

Нормативная база для проведения комплексного обследования технического состояния гражданских зданий включала СП 13-102-2003 и ГОСТ 31937-201, дополненные методическими рекомендациями от специализированных организаций. Основным результатом обследования – присвоение зданию категории технического состояния. Эта категория формировалась на основе детального анализа дефектов и повреждений строительных конструкций, грунтов основания и инженерных систем, а также оценки реальной несущей способности. Категория технического состояния является чисто техническим параметром, характеризующим механическую безопасность объекта, и не затрагивает экономические аспекты снижения его эксплуатационных характеристик.

Физический износ, в отличие от категории технического состояния здания, – преимущественно технико-экономический показатель. Его определение основывалось не только на выявлении дефектов и повреждений конструктивных элементов, но и на оценке затрат на их ликвидацию в объеме общего фонда ремонтно-восстановительных мероприятий.

Обычно оценка физического износа жилых зданий и их составляющих регулировалась ВСН 53-86(р). В 2018 году с целью актуализации были разработаны методические рекомендации «Правила оценки физического износа многоквартирных домов», которые дополнили СП 255.1325800.2016. Однако дальнейшее развитие нормативной базы привело к утверждению и введению в действие СП 454.1325800.2019. Предполагается, что эти изменения были вызваны началом масштабных программ городской реновации, т.к. проведение технико-экономического анализа на основе устаревших ВСН 53-86(р) в сочетании с ГОСТ 31937-2011 и СП 13-102-2003 стало невозможным.

Методика, изложенная в нормативных документах, позволила точно определить степень физического износа строительных конструкций, инженерных систем и здания в целом. Она предполагает проведение обследования, результаты которого затем сопоставляются с данными специальных таблиц, где различные дефекты и повреждения классифицированы по степени опасности и количественным характеристикам, и каждому из них соответствует определенный процент физического износа. Полученный процентный показатель износа, в свою очередь, стал основой для приблизительной оценки затрат на ремонт и принятия решения о целесообразности таких работ.

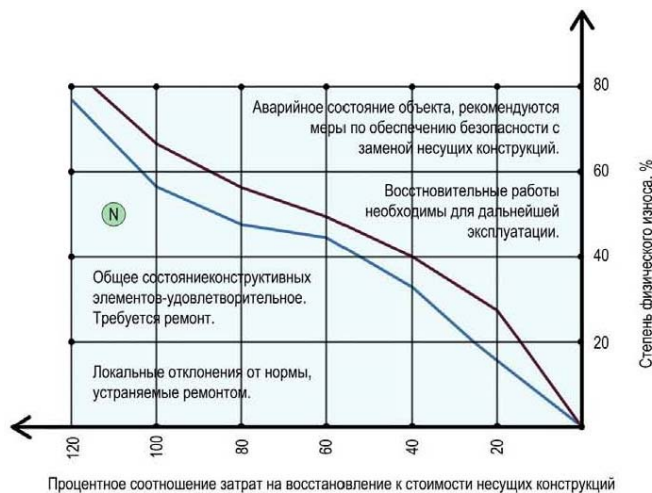


Рис. 6. Установленная закономерная связь между показателями физического износа несущих и ограждающих конструкций, общего состояния здания и величиной затрат на выполнение ремонтно-восстановительных работ. Прогнозируется экспоненциальный рост стоимости восстановительных мероприятий при увеличении степени износа элементов

На основе анализа статистических данных и имеющейся литературы установлено, что с течением времени здания подвергаются физическому износу, который в конечном счете может сделать ремонт нерентабельным, превысив стоимость самого

здания. Выделена ключевая область износа (50-60 %), в которой проведение ремонтных работ ещё считается экономически обоснованным. Несмотря на то что нормативные документы (ВСН53-86(р)) предписывают снос при 80 % износа, уже при достижении 70 % износа необходимо провести детальное технико-экономическое обоснование для принятия решения о восстановлении объекта.

Анализ состояния ряда городских объектов показал, что степень физического износа их основных конструктивных элементов достигла уровня, при котором капитальный ремонт или реконструкция являются наиболее рациональным решением. Такое заключение важно для градостроительства, т.к. исключает демонтаж зданий в пользу нового строительства, подтверждая целесообразность сохранения исторического облика и функционального обновления сложившейся городской среды.

Выводы

1. Установлено, что при капитальном ремонте и реконструкции, в сравнении с новым строительством, предоставляется большая свобода в разработке планировочных решений, позволяющая учитывать индивидуальные требования к проекту и создавать более вариативные пространства.
2. Определено, что целесообразность капитального ремонта возникает при уровне физического износа в пределах 50-60 %. При более низких показателях износа достаточно текущего ремонта. Вариант сноса объекта рекомендуется рассматривать, если физический износ превышает 70 %.

Список литературы

1. Беляева, Л.О. Оценка комфортности городской среды / Л.О. Беляева, К.И. Стрелец // Русский журнал строительных наук и технологий. – 2023. – № 1. – С.33–35.
2. Гусев, А.Д. Влияние характеристик резиновой крошки на свойства уличных травмобезопасных покрытий / А.Д. Гусев, Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина // Экология и промышленность России. – 2021. – Т.5, № 2. – С.12–17.
3. Даюб, Н. Исследование разработки реконструкции объектов строительства / Н. Даюб, А.А. Лапидус, М.А. Фахратов // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т.15, №2. – С.1–12.
4. Дерина, М.А. Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С.196–201.
5. Дерина, М.А. Перепланировка жилых зданий при реконструкции: оптимизация и последовательность проектирования / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Сазонова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С.196–202.
6. Дерина, М.А. Объемно-планировочная структура учреждений дошкольного образования 1960-80-х годов / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.П. Шамина // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №2(59). – С.215–224.
7. Лебедева, Т.А. Оценка эффективности ремонтно-строительных работ / Т.А. Лебедева // Вестник МИТУ-МАСИ. – 2020. – №1. – С.5–11.
8. Нотман, О.В. Индексный метод оценки качества городской среды: международный и российский опыт / О.В. Нотман // Вестник АГУ. – 2021. – №2. – С.89–99.
9. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №1(38). – С.203–208.
10. Петрянина, Л.Н. Методика повышения эффективности использования городских территорий при реконструкции жилых районов / Л.Н. Петрянина, А.В. Грешишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – №1-2(35).
11. Петрянина, Л.Н. К вопросу о комплексном градостроительном проектировании / Л.Н. Петрянина // Вестник Белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – №7. – С.57–64.

12. Яськова, Н.Ю. Комплексный подход к формированию качественной городской среды / Н.Ю. Яськова, В.И. Сарченко, С.А. Хиревич // Недвижимость: экономика, управление. – 2020. – №2. – С.12–21.

References

1. Belyaeva, L.O. Assessment of the urban environment comfort / L.O. Belyaeva, K.I. Strelets // Russian Journal of Construction Sciences and Technologies. – 2023. – No. 1. – P.33–35.

2. Gusev, A.D. Influence of the rubber crumb characteristics on the properties of street injury-safe coatings / A.D. Gusev, L.N. Petryanina, M.A. Derina // Ecology and Industry of Russia. – 2021. – Vol.5, No. 2. – P.12–17.

3. Dayub, N. Research of the Development of the Reconstruction of Construction Facilities / N. Dayub, A.A. Lapidus, M.A. Fakhratov // Bulletin of Eurasian Science. – 2023. – Vol.15, No.2. – P.1–12.

4. Derina, M.A. Architectural and Construction Design: Problems of Quality Assessment / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – No. 2(51). – P. 196–201.

5. Derina, M.A. Re-planning of residential buildings during reconstruction: optimization and design sequence / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Sazonova // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – No. 1(54). – P. 196–202.

6. Derina, M.A. The Spatial and Planning Structure of Preschool Education Institutions in the 1960s and 1980s / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.P. Shamina // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – №2(59). – P.215–224.

7. Lebedeva, T.A. Assessment of the Effectiveness of Repair and Construction Work / T.A. Lebedeva // Vestnik MITU-MASI. – 2020. – No.1. – P.5-11.

8. Notman, O.V. Index Method of Assessing the Quality of the Urban Environment: International and Russian Experience / O.V. Notman // Vestnik A.G.U. – 2021. – No. 2. – P. 89–99.

9. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina // Regional architecture and engineering. – 2019. – No.1(38). – P.203–208.

10. Petryanina L.N. The technique of increasing the efficiency of urban territories use in the reconstruction of residential areas / L.N. Petryanina, A.V. Grechishkin // Regional Architecture and Engineering. – 2018. – No. 1–2(35).

11. Petryanina, L.N. To the question of complex urban planning design / L.N. Petryanina // Bulletin of Belgorod Technological University named after V.G. Shukhov. – 2018. – No. 7. – P. 57–64.

12. Yas'kova, N.Yu. Complex approach to the formation of a high-quality urban environment / N.Yu. Yas'kova, V.I. Sarchenko, S.A. Khirevich // Real estate: economy, management. – 2020. – No. 2. – P. 12–21.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,
ул. Германа Титова, д.28,
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

Герасимов Владимир Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Дизайн»
E-mail : am_dialog@inbox.ru

Penza State University of Architecture and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

Gerasimov Vladimir Petrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the department «Design»
E-mail: am_dialog@inbox.ru

АРХИТЕКТУРНО-ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО ТРУБОЧНОГО ЗАВОДА В ПЕНЗЕ

В.П. Герасимов

Анализируются исторические объекты, расположенные на территории завода им. Фрунзе в г. Пензе (ранее – трубочный завод). Обоснована высокая культурная ценность для городской застройки здания силовой станции и водонапорной башни, являющихся одним из первых примеров применения сложных железобетонных конструкций на территории России в начале 20 века. Предложено использование объектов в рамках комплексной новой застройки.

Ключевые слова: архитектурная среда, реновация промышленной территории, история промышленной архитектуры, история монолитных железобетонных конструкций, идентичность, памятники инженерного искусства

ARCHITECTURAL AND HISTORICAL REVITALIZATION OF INDUSTRIAL FACILITIES ON THE SITE OF A FORMER PIPE FACTORY IN PENZA

V.P. Gerasimov

The historical objects located on the territory of the plant named after Frunze in Penza (formerly the pipe plant) are analyzed. The high cultural value of the power plant and water tower buildings for urban development, which are one of the first examples of the use of complex reinforced concrete structures in Russia at the beginning of the 20th century, is substantiated. It is proposed to use the facilities as part of a comprehensive new development.

Keywords: architectural environment, renovation of industrial territory, history of industrial architecture, history of monolithic reinforced concrete structures, identity, monuments of engineering art

Замена промышленной зоны в центральной части города на жилую застройку в настоящее время является типичной ситуацией. В этих условиях нередко возникает коллизия между сохранением и уничтожением отдельных объектов – носителей исторической преемственности. Сохранение существенно более сложный, не дающий очевидной экономической выгоды. Однако в определенных условиях возможны неординарные решения, при которых затраты на сохранение исторических объектов могут быть компенсированы косвенными факторами: рациональным архитектурно-функциональным решением, экономическими предпочтениями, продуманным брендингом, репутацией.

Актуальность исследований (натурных и архивных) заключается в выявлении исторической ценности объектов и в разработке схем по их сохранению в условиях

реновации крупной промышленной территории на примере центральной части города Пензы. Работа выполнена в развитие ранее проведенных исследований [1].

На территории, занимаемой бывшим заводом им. Фрунзе (ЗИФ, ранее – Пензенский трубочный завод, 55 га), имеется множество объектов, представляющих историческую ценность [1]. Из них рассмотрим два объекта, которые расположены рядом и сохранение которых, на наш взгляд, может придать новой застройке дополнительные привлекательные черты, как с точки зрения архитектурной среды, так и с точки зрения экономики.

Оба объекта, запроектированные и построенные в период 1915-1918 годов, независимо от статуса объекта культурного наследия (ОКН), являются знаковыми памятниками инженерного искусства, поскольку служат одними из первых примеров применения на территории России, а возможно, и в Европе, сложных монолитных конструкций из железобетона. Подтверждением высокой ценности этих объектов является их подробнейшее описание в классической книге одного из основоположников теории железобетона в нашей стране – П.А. Пастернака (*Peter Pasternak*) [2, с. 5-11, 317], который по многим косвенным признакам является их автором (с. 317), хотя в архивных проектных документах в качестве ответственного лица Черноморского строительного общества (организация, ответственная за проектирование и строительство) упомянут инженер-технолог Сергей Иванович Катонин.

Первый объект известен: башня водонапорная (является объектом культурного наследия).

Водонапорная башня в виде железобетонной пространственной рамы с восемью наклонными прямолинейными колоннами (рис. 1) до конца 60-х годов прошлого века являлась самым высоким сооружением в городе, имея высоту около 50 метров (45 м до низа уровня воды в верхнем резервуаре на 15 000 ведер (180 м³)). В книге [2] ошибочно указано 6 колонн, 35 м и 250 м³ соответственно. Колонны башни разделены горизонтальными железобетонными ребристыми диафрагмами на несколько ярусов и связаны между собой кольцевыми балками. Колонны пространственной рамы имеют переменное сечение (400×1050 в основании) и в верхней части образуют криволинейные консоли, на которые опираются шлакоблочные стенки и внутри которых расположен круглый в плане железобетонный резервуар с днищем в форме сферической оболочки, в свою очередь опирающийся на вертикальную цилиндрическую железобетонную трубу внутренним диаметром 2010-2050 мм. Внутри трубы устроена монолитная винтовая лестница и проложены вертикальные трубопроводы. Контур резервуара и цилиндра утеплены. К основанию башни пристроено одноэтажное здание (мастерские, машинное отделение). Вероятно, в этом здании расположены также подземный резервуар и 3 артезианские скважины (точные сведения отсутствуют).

В результате изучения архивных материалов установлено, что до начала проектирования, в конце декабря 1915 года, были проведены конкурсные процедуры, на которые представили 3 варианта конструктивного исполнения башни (рис.2):

- башня железобетонная стенового типа стоимостью 54 500 рублей, по аналогии с конструкцией морских маяков (Волжский бетонный завод, Самара);
- башня металлическая стержневая системы В.Г. Шухова стоимостью 42 500 рублей и сроком изготовления 6 месяцев (фирма инженера Н.В. Бари). В настоящее время башня известна по многочисленным аналогам, в том числе по знаменитой башне на Шаболовке аналогичной конструкции;
- башня железобетонная стержневого типа (Черноморское строительное общество, стоимостью 50 000 рублей). Она имела несколько вариаций конструктивного исполнения, которые представлены на рис. 3.

Вариант Черноморского строительного общества был принят в качестве основного, и 21 февраля 1916 был подписан контракт на срок 3 месяца (до 15 сентября 1916), который, ввиду очевидной нереальности даже по современным представлениям, не был исполнен. Обращает на себя внимание дата сдачи объекта, совпадающая с эпохой грандиозных перемен в стране (например, в архиве имеется акт сдачи «цистерной» при башне на 8250 рублей, датированный 18 сентября 1917 года).



Рис. 1. Башня водонапорная на территории трубного завода в Пензе, в настоящее время (слева, фото автора) и в момент строительства (<http://пензвед.рф/>)

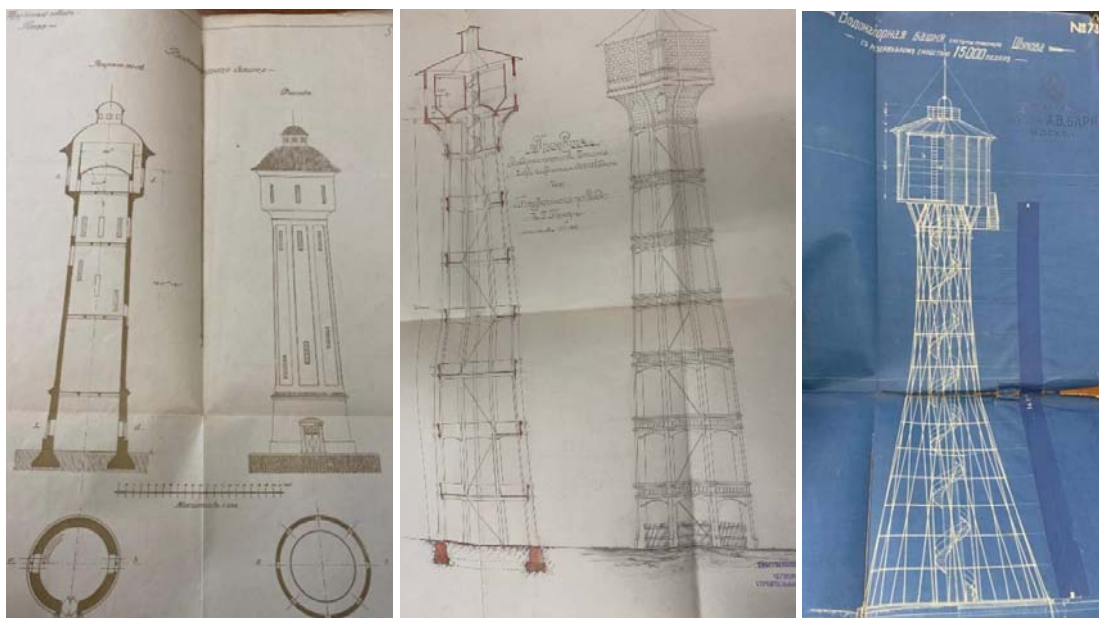


Рис.2. Варианты водонапорной башни, представленные на конкурсе по запросу заказчика (декабрь 2016 г., по материалам государственного архива Пензенской области (материалы ГАПО))

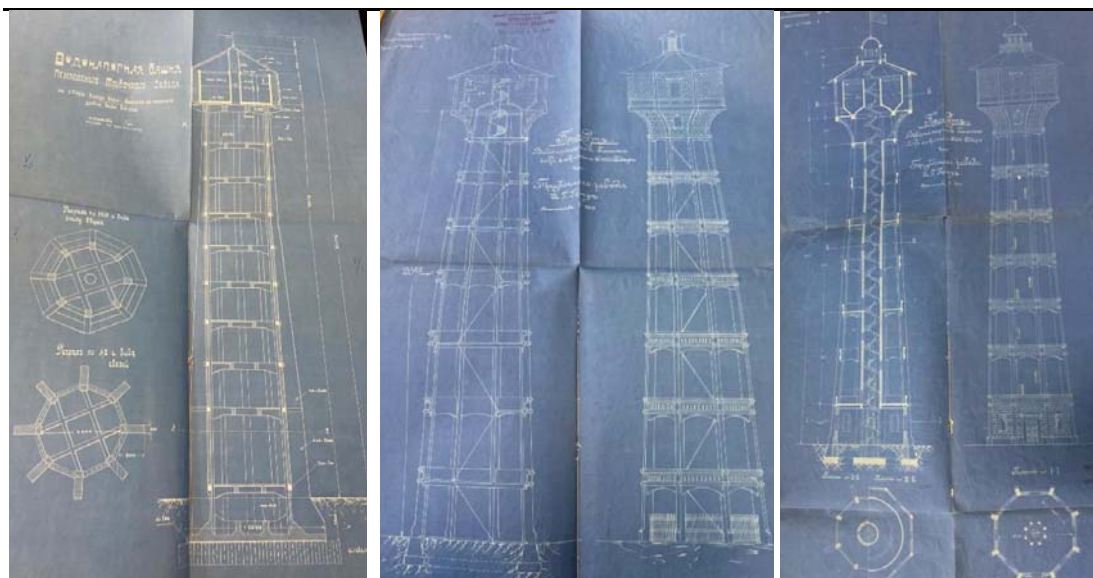


Рис. 3. Модификации конструктивных решений основного варианта башни (в том числе без центральной опоры, с ярусами и маршевой лестницей, с двумя резервуарами в верхней части (материалы ГАПО))

Из архивных источников было установлено, что конструкция башни не является оригинальной. Оказалось, что башни похожей конструкции и такого же времени строительства (1915-1917 годы) имеются в разных европейских городах (рис. 4).



Рис. 4. Водонапорные башни в южной Голландии:
 Хазерсвуд-Рейндейк (https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g3411242-d28527120-Reviews-Watertoren_Hazerswoude_rijndijk_1915-Hazerswoude_Rijndijk_South_Holland_Provinc.html)
 Лейден (<https://ru.pinterest.com/pin/381117187221223822/>),
 Нью-Леккерланд (<https://dwgformat.ru/2021/01/01/luchshaya-rekonstrukciya-vodonapornoj-bashni-po-versii-watertowerprize-2020/>)

Учитывая, что П.Л. Пастернак до 1914 г. учился и работал в Цюрихе и Женеве, использование данной конструктивной схемы выглядит закономерным. Важно отметить, что в авторской интерпретации пензенская башня намного интереснее и сложнее известных европейских аналогов. Отдельный вопрос – современное состояние сравниваемых объектов. При наличии некоторого отечественного опыта повторного использования старых водонапорных башен [5, 6], европейский опыт (например,

ежегодный архитектурный конкурс в Голландии Watertowerprize) представляет особый интерес, поскольку имеется большое количество примеров сохранения и разумного приспособления объектов именно рассматриваемой конструкции.

Второй объект – здание силовой станции – практически неизвестен и не является официально объектом культурного наследия, однако реальная его ценность, судя по описанию П.Л. Пастернака [2], не уступает предыдущему .

Здание силовой станции (котельная тепловой электростанции) представляет интерес как один из самых первых примеров применения сложных рамно-арочных железобетонных конструкций, по крайней мере, на территории России.

Здание состоит из нескольких блоков, основным из которых является двухпролетный цех (машинный и котельный залы), образованный 2-шарнирными рамами с арочными ригелями пролетами 23,5 и 15,8 метров (в свету) (рис. 5). Заметим, что в архивных чертежах ригели показаны с затяжкой, а фактически – затяжка отсутствует. Можно предположить, что имела место корректировка начального решения, точно так же, как и в процессе проектирования башни (рис. 3). В более ранней работе по территории завода [1], были рассмотрены похожие конструктивные решения расположенных рядом цехов, отличающиеся большим разнообразием инженерных новинок (рамные железобетонные конструкции, системы утепления стен и покрытия, системы водоотведения с покрытия, освещение цехов). Однако здание силовой станции по всем параметрам выделяется своей инженерной оригинальностью и сложностью. К особенностям здания силовой станции можно отнести следующие смелые и новые для того времени инженерные решения:

- применение арочных рам без затяжек больших пролетов (24 метра);
- устройство рам, имеющих большую высоту стоек (около 15 метров);
- применение нестандартного решения со сложными шарнирными опорами железобетонных стоек рам в фундаментах;
- использование подкрановых железобетонных балок грузоподъемностью до 15 тонн;
- устройство железобетонного ребристого сводчатого покрытия, представляющего собой короткие цилиндрические оболочки, до этого времени неизвестные в строительстве.

Именно здание силовой станции без ссылки на его месторасположение (г. Пенза) подробно описано в книге П.Л. Пастернака [2, с. 9-11]. Насколько можно судить по имеющимся фотографиям – состояние железобетонного каркаса удовлетворительное (рис. 6).

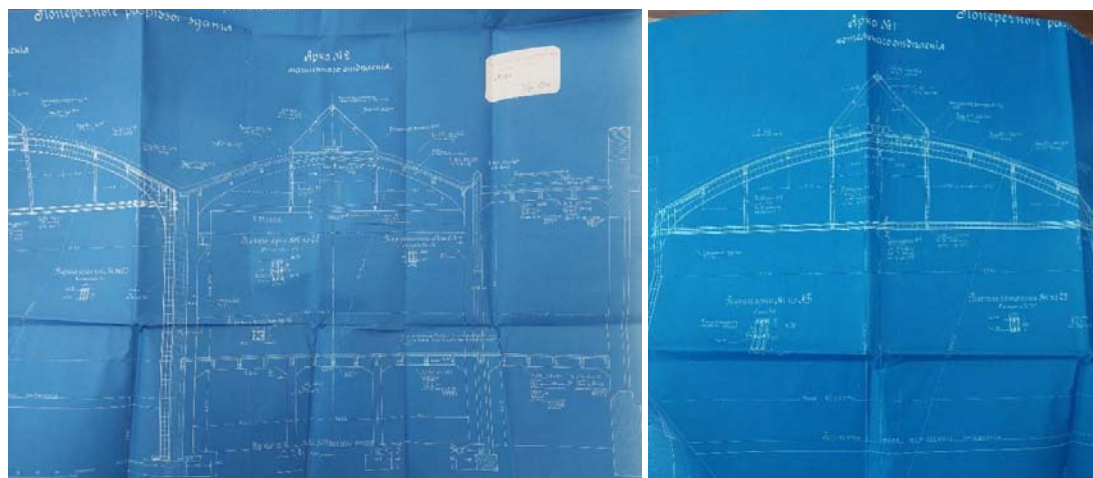


Рис. 5. Фрагменты чертежей разреза машинного и котельного отделений тепловой электростанции (материалы ГАПО)



Рис. 6. Здание силовой станции. Сравнение иллюстраций из книги П.Л. Пастернака ([2] сверху) и современного состояния цеха (внизу, фото из интернета)

Предложения. Возможная утрата при новой застройке рассмотренных выше объектов будет существенной потерей для культурного кода и архитектуры города.

Сохранение и рациональное использование рассмотренных выше производственных объектов может оказаться рентабельным для застройщика, о чем свидетельствует отечественный [5, 6] и зарубежный опыт ([7], рис. 4) освоения промышленных территорий (рекреационные пространства с учетом исторической преемственности) и отдельных сооружений (арт-пространства, музейные, торговые, гостиничные, офисные помещения, смотровые площадки).

Представления об архитектурной среде и интерьерах сохраняемых корпусов на бывшей территории трубочного завода показаны на рис. 7.



Рис. 7. 3D-моделирование средового пространства и интерьеров отдельных цехов бывшего трубочного завода (начало)

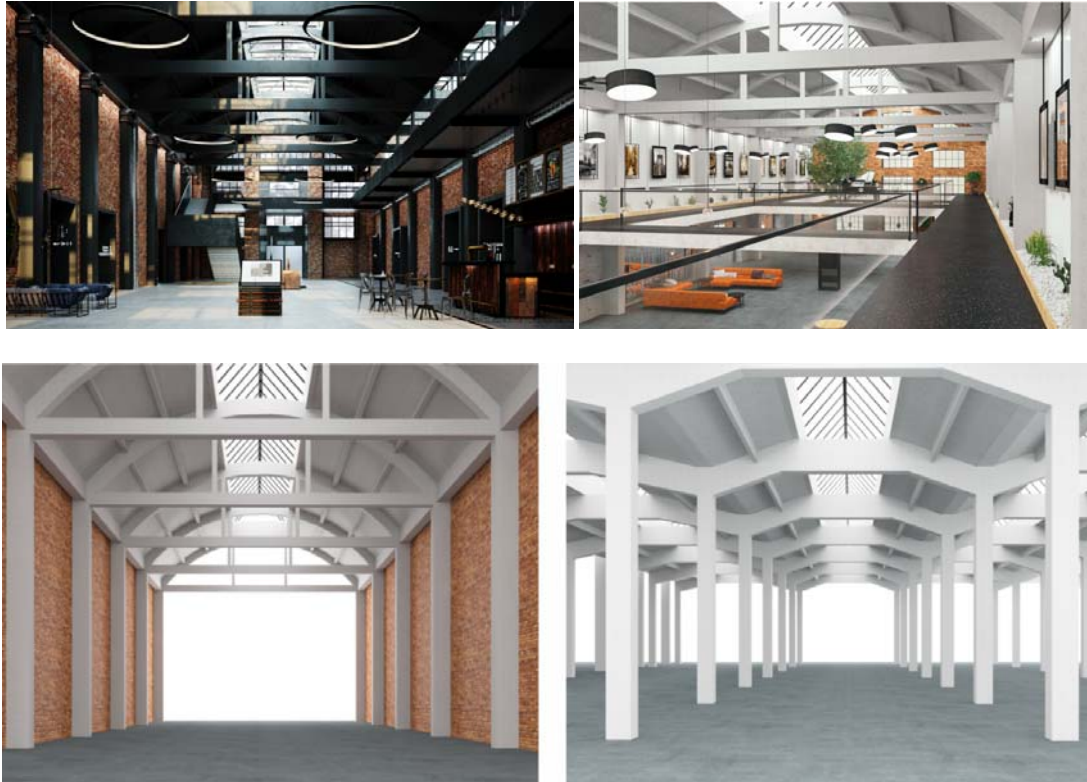


Рис. 7. 3D-моделирование среднего пространства и интерьеров отдельных цехов бывшего трубного завода (окончание)

Выводы.

1. Выполнен комплексный анализ с учетом архивных материалов, для двух уникальных исторических объектов: водонапорной башни и здания силовой станции, расположенных на территории бывшего трубного завода в г. Пензе и представляющих ценность как памятники инженерного искусства начала 20-го века (один из первых примеров применения сложных железобетонных конструкций на территории России).
2. Проведены натурные обследования водонапорной башни и здания силовой станции, определено их состояние.
3. Обоснована высокая культурная ценность представленных объектов, как идентификационных маркеров Пензенского региона.
4. Даны предложения по сохранению рассмотренных исторических объектов с учетом экономически обоснованной их интеграции в условия новой застройки.

Список литературы

1. Бочарова, Ю.В. Территория и объекты завода имени М.В. Фрунзе в контексте развития городской среды города Пензы / Ю.В. Бочарова, М.Т. Хрюкина. – DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.18 // Градостроительство и архитектура. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 131–137.
2. Пастернак, П.Л. Железобетонные конструкции. Специальный курс / П.Л. Пастернак. – Москва : Госстройиздат, 1961. – 560 с.
3. Отчет о техническом обследовании водонапорной башни Н=50,0 м, расположенной на территории ОАО «ЗИФ ПЛЮС» по адресу: г. Пенза, ул. Ленина, 3 (Гарькин, 2020 г. Заказчик: ООО Научно производственный центр «Цера»).
4. АКТ государственной историко-культурной экспертизы проекта зон охраны объекта культурного наследия регионального значения «Водонапорная башня»,

расположенного по адресу: Пензенская область, г. Пенза, территория ПО «Завод им. М.В. Фрунзе», 25.07.2024 г.

5. Агеева, Е.Ю. Российский опыт реновации неэксплуатируемых водонапорных башен / Е.Ю. Агеева, А.Л. Дубов. – Нижний Новгород : ННГАСУ. – 73 с.

6. Агеева, Е.Ю. Реновация водонапорных башен: типологический анализ / Е.Ю. Агеева, Н.А. Гоголева. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-1-2-19-29> // Жилищное строительство. – 2019. – № 1–2. – С.19–29.

7. Веснин, И.В. Формирование новых архитектурных пространств при реновации водонапорных башен / И.В. Веснин, В.В. Кунцевич ; науч. рук. О.И. Сысоева // Актуальные проблемы архитектуры и градостроительства : материалы 74-й студенческой научно-технической конференции, 19 апреля – 3 мая 2018 г. / сост. П.Г. Вардеванян ; редкол.: Г.А. Потаев, Е.Е. Нитиевская. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 23–29.

References

1. Bocharova, Yu.V. The territory and facility of the M.V. Frunze plant in the context of the development of the urban environment of Penza / Yu.V. Bocharova, M.T. Khryukina. – DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.18 // Urban Planning and architecture. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 131–137.

2. Pasternak, P.L. Reinforced concrete structures. Special course / P.L. Pasternak. – Moscow : Gosstroyizdat, 1961. – 560 p.

3. Maintenance report on the water tower H =50.0 m, located on the territory of JSC ZIF PLUS at the address: Penza, Lenin St., 3 (Garkin, 2020). Customer: LLC scientific production center «Cera»).

4. ACT of the state historical and cultural expertise project of the zone of protection of an object of cultural heritage of regional significance «Vodonapornaya Tower», located at the address: Penza region, Penza, Territory of the M.V. Frunze Plant, 07/25/2024.

5. Ageeva, E.Y. The Russian experience of renovation of non-platform water towers / E.Y. Ageeva, A.L. Dubov. – Nizhny Novgorod : NNGASU. – 73 P.

6. Ageeva, E.Y. Renovation of water towers: a typological analysis / E.Y. Ageeva, N.A. Gogoleva. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-1-2-19-29> // Housing construction. – 2019. – No. 1–2. – P.19–29.

7. Vesnin, V.V. The formation of new architectural spaces during the renovation of water towers / V.V. Vesnin, V.V. Kuntsevich ; scientific supervisor. O.I. Sysoeva // Actual problems of architecture and urban planning : materials of the 74th Student Scientific and Technical Conference, April 19–May 3, 2018 / comp. P.G. Vardevanyan ; editors: G.A. Potaev, E.E. Nitievskaya. – Minsk : BNTU, 2018. – P. 23–29.