

**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:**

А.М. Данилов (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 1.12.2025.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 28,625. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 174.

Дата выхода в свет 10.12.2025.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(65)/2025

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Черкасов В.Д., Емельянов А.И.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА  
ДЕЙСТВИЯ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ ..... 5

**Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г.,  
Иванов А.В., Макридин Н.И.**  
МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКА  
ДАННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГРУНТОВ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ  
И СООРУЖЕНИЙ ..... 11

**Лесовик В.С., Сальникова А.С., Дудченко В.А.**  
РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ  
ВЯЖУЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА  
КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА..... 21

**Кошев А.Н., Кузина В.В.,  
Гвоздева О.М., Варенцов В.К.**  
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА  
МЕТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН  
ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ РЕАКЦИОННОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕГРАФИТОВОГО  
ВОЛОКНИСТОГО ЭЛЕКТРОДА ..... 32

**Куимова Е.И., Логанина В.И., Рыжов А.Д.**  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
САМООЧИЩЕНИЯ ИЗВЕСТКОВЫХ  
ПОКРЫТИЙ ..... 38

**Колесников Г.Н.**  
САМАННЫЕ БЛОКИ ИСТОРИЧЕСКИХ  
ПОСТРОЕК: АППРОКСИМАЦИЯ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ..... 45

**Романенко И.И., Петровнина И.Н.**  
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО  
ВЯЖУЩЕГО НА КОРРОЗИОННУЮ  
СТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ ..... 52

**Сальникова А.С., Елистраткин М.Ю.,  
Казлитина О.В., Поспелова Е.А.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
МИКРОАРМИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ  
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ВЫСОКОПРОЧНОГО  
САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА..... 60

© Авторы публикаций, 2025

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2025

© ПГУАС, 2025

<b>Степина И.В.</b> «ЗЕЛЕННЫЕ» СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ ..... 73	<b>Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Лебединский К.В., Алексеев Д.П., Марынов И.В.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ УСТАНОВКИ ВИХРЕВОЙ САТУРАЦИИ..153
<b>Баранов А.С., Зюзин Д.О.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ ..... 81	<b>Столяров Д.В., Королева Т.И.</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В КИНЕТИЧЕСКОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ..... 164
<b>Низин Д.Р., Низина Т.А., Лукачевская И.Г., Чибулаев И.А., Спирин И.П., Пивкин Н.А.</b> НАТУРНОЕ КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УМЕРЕННОМ, СУБТРОПИЧЕСКОМ, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОМ И АРКТИЧЕСКОМ КЛИМАТАХ ..... 90	<b>Боронина Л.В.</b> КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ КОММУНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ НАУКИ О ТРУБОПРОВОДАХ..... 174
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ..... 106	<b>Пономарева И.К.</b> РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ КЛИМАТИЗАЦИИ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ..... 183
<b>Селяев В.П., Лазарев А.Л., Архипов И.В.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ЦЕЛЬНОЙ И КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ... 106	АРХИТЕКТУРА..... 192
<b>Николюкин А.Н., Антонов В.М., Монастырёв П.В., Лисовский В.А.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ ..... 115	<b>Князева М.В., Казакова Я.А.</b> ПРОБЛЕМА УВЕКОВЕЧИВАНИЯ РАЗРУШЕННЫХ ХРАМОВ: УТРАЧЕННЫЕ ХРАМЫ РЯЗАНИ КАК ОБЪЕКТЫ РЕЛИГИОЗНОГО ТУРИЗМА И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ..... 192
<b>Гарькина И.А., Языев С.Б., Артемьев Д.А.</b> ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ: ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД..... 130	<b>Петрянина Л.Н., Дерина М.А., Усова А.А.</b> АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЁ НАПРАВЛЕНИЙ..... 202
<b>Снежкина О.В., Овчинников И.И.</b> ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ..... 137	<b>Кондратьев Э.В.</b> ФРАКТАЙЛИНГ – УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРАКТИК РЕГУЛЯРНОГО МЕНЕДЖМЕНТА ..... 212
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 145	<b>Потапова А.Ю., Местников А.Е.</b> КИРПИЧНОЕ ЗДАНИЕ ЯКУТСКОГО ОБЛАСТНОГО КАЗНАЧЕЙСТВА – ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ НАЧАЛА XX ВЕКА..... 218
<b>Гришин Б.М., Бикунова М.В., Чертег К.Л., Игнаткина Д.О.</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ..... 145	Указатель статей, опубликованных в 2025 году ..... 225

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Nizin D.R., Nizina T.A., Lukachevskaya I.G., Chibulaev I.A., Spirin I.P., Pivkin N.A. NATURAL CLIMATIC AGING OF CONSTRUCTION EPOXY POLYMERS IN TEMPERATE, SUBTROPICAL, EXTREMELY COLD AND ARCTIC CLIMATES .....	90
<b>Cherkasov V.D., Emelyanov A.I.</b> STUDY OF THE MECHANISM OF FOAMING AGENTS ACTION IN CEMENT COMPOSITES.....	5	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS .....	106
<b>Idrisov I.Kh., Boldyrev G.G., Ivanov A.V., Makridin N.I.</b> METHODS AND DATA PROCESSING FOR TESTING THE SOILS FOR BUILDINGS AND STRUCTURES FOUNDATIONS.....	11	<b>Selyaev V.P., Lazarev A.L., Arhipov I.V.</b> DETERMINATION OF THE STRESS INTENSITY FACTOR OF SOLID AND GLUED WOOD.....	106
<b>Lesovik V.S., Salnikova A.S., Dudchenko V.A.</b> DEVELOPMENT OF COMPOSITE BINDERS USING CERAMIC BRICK RECYCLING PRODUCTS.....	21	<b>Nikolyukin A.N., Antonov V.M., Monastyrev P.V., Lisovskiy V.A.</b> APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING THE BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES....	115
<b>Koshev A.N., Kuzina V.V., Gvozdeva O.M., Varentsov V.K.</b> OPTIMIZATION OF CARBON FIBER METALLIZATION PROCESS AT DISTRIBUTED REACTION SURFACE OF CARBON GRAPHITE FIBER ELECTRODE .....	32	<b>Garkina I.A., Yazyev S.B., Artemyev D.A.</b> ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDING STRUCTURES: AN ENTROPY APPROACH.....	130
<b>Kuimova E.I., Loganina V.I., Ryzhov A.D.</b> MODELING THE PROCESS OF SELF-CLEANING OF LIME COATINGS .....	38	<b>Snezhkina O.V., Ovchinnikov I. I.</b> CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE ZONE OF TRANSVERSE FORCES ACTION .....	137
<b>Kolesnikov G.N.</b> ADOBE BLOCKS OF HISTORICAL BUILDINGS: APPROXIMATION OF SAMPLES TEST RESULTS .....	45	ENGINEERING SYSTEMS.....	145
<b>Romanenko I.I., Petrovnina I.N.</b> THE INFLUENCE OF COMPOSITE BINDING AGENT COMPOSITION ON CORROSION RESISTANCE OF CONCRETE .....	52	<b>Grishin B.M., Bikunova M.V., Chertes K.L., Ignatkina D.O.</b> DEVELOPMENT OF PURIFYING TECHNOLOGY FOR GROUNDWATER WITH HIGH CONTENT OF ORGANIC AND MINERAL IMPURITIES.....	145
<b>Salnikova A.S., Elistratkin M.Yu., Kazlitina O.V., Pospelova E.A.</b> INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MICRO-REINFORCING ADDITIVES ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SELF-SEALING CONCRETE .....	60	<b>Andreev S.Yu., Safronov M.A., Lebedinsky K.V., Alekseev D.P., Marynov I.V.</b> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A VORTEX SATURATION UNIT .....	153
<b>Stepina I.V.</b> GREEN BUILDING MATERIALS BASED ON LIGNOCELLULOSIC RAW MATERIALS...	73	<b>Stolyarov D.V., Koroleva T.I.</b> NUMERICAL SIMULATION OF TWO-STAGE COMBUSTION OF METHANE-HYDROGEN FUEL MIXTURES IN A KINETIC BURNER DEVICE .....	164
<b>Baranov A.S., Zyuzin D.O.</b> EXPERIMENTAL STUDY OF COMPOSITE MATERIALS FOR STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE SPAN STRUCTURES .....	81	<b>Boronina L.V.</b> QUANTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF UTILITY INFRASTRUCTURE ENGINEERING NETWORKS IS A NEW DIRECTION IN PIPELINE SCIENCE.....	174
		<b>Ponomareva I.K.</b> DEVELOPMENT OF INNOVATIVE PRINCIPLES OF CLIMATIZATION IN ORTHODOX RELIGIOUS BUILDINGS .....	183

---

ARCHITECTURE.....	192	<b>Kondratyev E.V.</b>	
<b>Knyazeva M.V., Kazakova Y.A.</b>		FRACTALING – MANAGEMENT	
THE PROBLEM OF PERPETUATING		THROUGH BEHAVIOR PATTERNS.....	212
DESTROYED TEMPLES: THE LOST		<b>Potapova A.J., Mestnikov A.E.</b>	
TEMPLES OF RYAZAN AS OBJECTS OF		THE BRICK BUILDING OF THE YAKUTSK	
RELIGIOUS TOURISM AND CULTURAL		REGIONAL TREASURY IS AN	
HERITAGE .....	192	ARCHITECTURAL MONUMENT OF THE	
<b>Petryanina L.N., Derina M.A., Usova A.A.</b>		EARLY 20TH CENTURY.....	218
ARCHITECTURAL AND PLANNING			
MODERNIZATION OF SCHOOL		Index of articles,	
BUILDINGS AND DEFINITION OF ITS		published in 2025.....	225
DIRECTIONS.....	202		



# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.327.333

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_5

*Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарева*

Россия, 430005, Саранск,  
ул. Большевикская, д. 68,  
тел.: (8342)47-37-13; факс: (8342)47-37-13

**Черкасов Василий Дмитриевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Прикладная механика»,  
чл.-кор. РААСН  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

**Емельянов Алексей Иванович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Прикладная механика»  
E-mail: emeljanovai@list.ru

*Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430005, Saransk,  
68, Bolshhevistskaya St.,  
tel.: (8342)47-37-13; fax: (8342)47-37-13

**Cherkasov Vasily Dmitrievich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Applied Mechanics»,  
Corresponding Member of the Russian  
Academy of Architectural and Construction  
Sciences  
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

**Emelyanov Aleksey Ivanovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Applied Mechanics»  
E-mail: emeljanovai@list.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ

В.Д. Черкасов, А.И. Емельянов

Эксплуатационные характеристики пенобетонных изделий в значительной степени зависят от вида используемой пенообразующей добавки. Каждая добавка имеет оптимальную концентрацию, при которой возможно получение пены с высокой кратностью и стойкостью в растворе. Проводились исследования влияния концентрации пенообразователя на процессы гидратации и структурообразования цементного камня. Установлено, что при увеличении содержания добавки прочность цементного камня на ранних стадиях твердения значительно уменьшается. Рентгеноструктурные исследования показали, что повышение концентрации пенообразователя приводит к уменьшению количества продуктов реакции алита, оказывает негативное влияние на скорость гидратации силикатных составляющих цемента и интенсивность формирования новообразований.

*Ключевые слова: пенобетон, пенообразователь, цементный камень, гидратация, структурообразование, прочность, адсорбция*

### STUDY OF THE MECHANISM OF FOAMING AGENTS ACTION IN CEMENT COMPOSITES

V.D. Cherkasov, A.I. Emelyanov

The performance characteristics of foam concrete products largely depend on the type of foaming additive used. Each additive has an optimal concentration which makes it is possible to obtain foam with high expansion and stability in the solution. The paper studies the effect of foaming agent

concentration on the processes of hydration and structure formation of cement stone. It has been established that with an increase in the additive content, the strength of cement stone at the early stages of hardening decreases significantly. X-ray diffraction studies have shown that an increase in the foaming agent concentration leads to a decrease in the amount of alite reaction products, has a negative effect on the hydration rate of silicate components of cement and the intensity of formation of new formations.

*Keywords: foam concrete, foaming agent, cement stone, hydration, structure formation, strength, adsorption*

В настоящее время выпускается широкий ассортимент пенообразующих добавок, позволяющих в широких пределах регулировать плотность ячеистых композитов. Накоплен большой объем опытных данных по применению их растворов. Исследование механизма действия пенообразователей в цементных композициях будет способствовать синтезу более эффективных аналогов, позволяющих получать материалы с качественной ячеистой структурой.

Как известно, развитие хода процесса гидратации, особенно в ранние сроки структурообразования, определяет последующие физико-химические и эксплуатационные свойства композита [1-4]. Физико-механические характеристики пенобетонов в значительной степени зависят от вида используемого пенообразователя, применение которого может приводить к замедлению процессов схватывания и твердения цементной системы [5-8].

В данной работе представлены результаты исследований закономерностей влияния пенообразователя на процессы гидратации и структурообразования цементного камня.

Для достижения цели разработаны составы пенобетонов, при этом в качестве минеральной составляющей использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Б и наполнитель – известняковую муку с содержанием карбоната кальция 91...92 %, а в качестве пенообразователя – белковый гидролизат из отходов молочной промышленности [9]. Применение в производстве пенобетонов поверхностно-активных веществ (ПАВ) негативно влияет на темпы твердения цементной системы, поэтому исследовано влияние используемого в составах пенообразователя на процессы структурообразования цементного камня. Степень отравления вяжущего раствором пенообразователя оценивали по влиянию его концентрации на прочность цементного камня. Как видно из таблицы, при увеличении содержания пенообразующей добавки прочность цементного камня на ранних стадиях твердения значительно уменьшается, что является следствием замедления процессов гидратации и структурообразования. При введении ПАВ в небольших количествах (0,3 %) к 28-м суткам твердения прочность образцов увеличивается на 2 %, а с увеличением содержания добавки (0,6 %) наблюдается снижение прочности, связанное с повышением воздухововлечения при приготовлении образца.

Влияние ПАВ на прочность цементного камня

Количество добавки, % от массы цемента	Прочность при сжатии, МПа		
	3 сут	7 сут	28 сут
0	23,7	30,6	45,8
0,3	20,1	31,1	46,9
0,6	16,1	23,7	39,4

Наблюдаемые процессы обусловлены адсорбцией молекул белков на цементе. При повышенном содержании добавки ее молекулы адсорбируются на поверхности зерен исходного цемента и образующихся гидратных фаз, что сопровождается замедлением гидратации цемента. С увеличением концентрации пенообразующей добавки до 0,6 % величина адсорбции возрастает до 50 мг/г, что составляет 5 % от массы цемента (рис. 1).

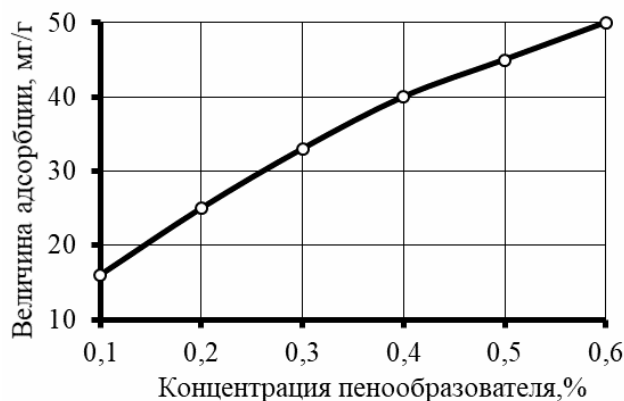


Рис. 1. Адсорбция ПАВ в зависимости от его концентрации

Таким образом, белковый пенообразователь, в начале процесса твердения адсорбируясь на поверхности частиц, снижает скорость растворения вяжущего. Образующаяся пленка из молекул ПАВ мешает образованию и объединению центров кристаллизации, что приводит к изменению сроков начала и конца схватывания. Проведенные исследования показали, что влияние пенообразователя на сроки схватывания при концентрации до 0,45 % незначительно.

Для установления структурных изменений, происходящих в цементных композициях с добавкой пенообразователя, проведены рентгеноструктурные исследования на дифрактометре «Дрон-6» с ионизационной регистрацией интенсивности рентгеновских лучей. Снятие рентгенограмм производилось через 1, 3, 7 и 28 суток твердения образцов при н.в.у.

Фазовый состав всех исследованных образцов практически одинаков. Основные дифракционные максимумы отражены на рис. 2–5 и относятся к следующим фазам:  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  (алит) –  $d, \text{\AA} = 3,02; 2,75; 2,61; 2,18; 1,76; 1,63; 1,48$ ;  $\text{CaCO}_3 - d, \text{\AA} = 3,04, 2,3$ ;  $\text{SiO}_2 - d, \text{\AA} = 4,29; 2,45; 1,81; 1,54$ ;  $\text{Ca}(\text{OH})_2 - d, \text{\AA} = 2,63; 1,92$ ;  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (белит) –  $d, \text{\AA} 2,18 \text{\AA}$ . В качестве «аналитического» пика для количественного контроля непрореагировавшего алита в цементном камне наиболее пригоден рефлекс с  $d = 1,76 \text{\AA}$ , так как он не перекрывается другими линиями и его интенсивность велика ( $\approx 40\%$  от интенсивности максимального рефлекса), что подтверждается литературными данными [10].

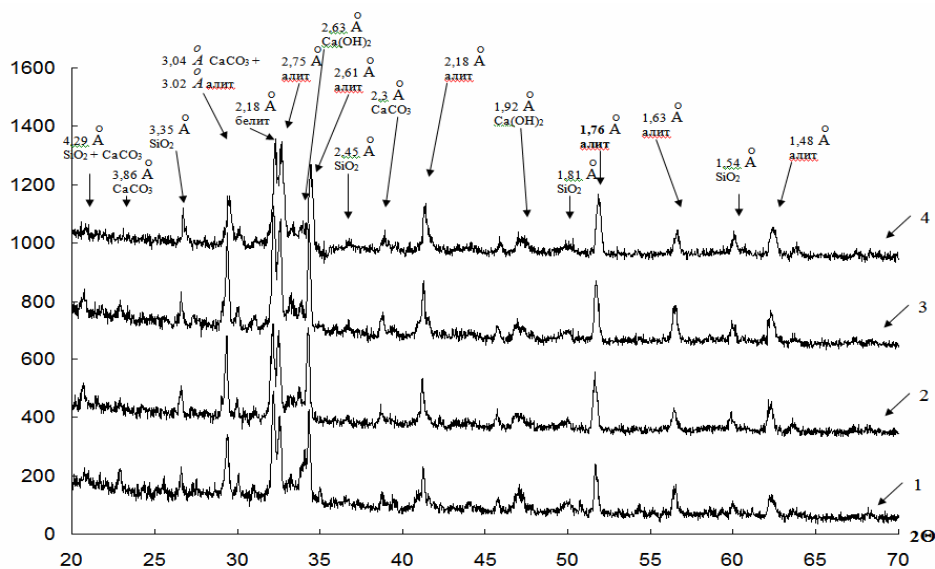


Рис. 2. Рентгенограмма цементного камня после 1 суток твердения (Количество добавки, от массы цемента: 1 – 0; 2 – 0,3 %; 3 – 0,6 %; 4 – 0,9 %)

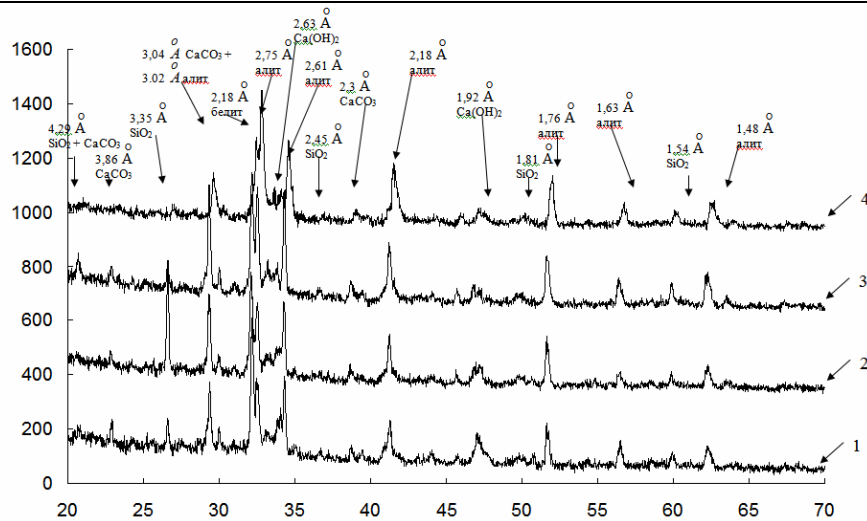


Рис. 3. Рентгенограмма цементного камня после 3 суток твердения  
(Количество добавки, от массы цемента: 1—0; 2—0,3 %; 3—0,6 %; 4—0,9 %)

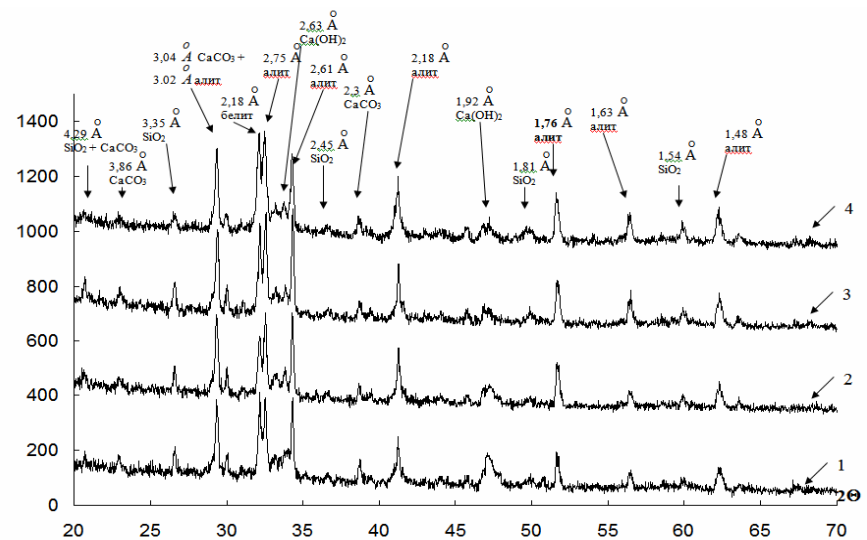


Рис. 4. Рентгенограмма цементного камня после 7 суток твердения  
(Количество добавки, от массы цемента: 1—0; 2—0,3 %; 3—0,6 %; 4—0,9 %)

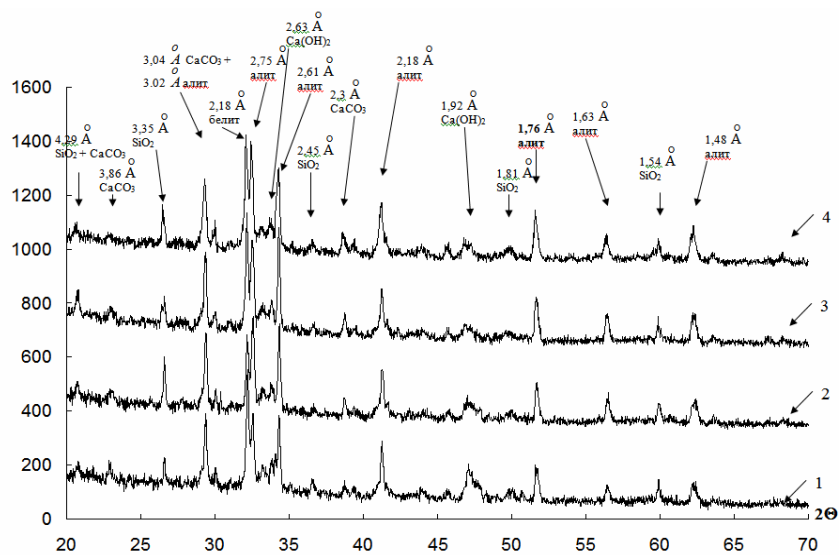


Рис. 5. Рентгенограмма цементного камня после 28 суток твердения  
(Количество добавки, от массы цемента: 1—0; 2—0,3 %; 3—0,6 %; 4—0,9 %)

Рентгеноструктурные исследования показали, что увеличение содержания добавки приводит к уменьшению количества продуктов реакции алита, о чем свидетельствует снижение интенсивности рефлекса  $3,86 \text{ \AA}$   $\text{CaCO}_3$  и рефлекса  $1,92 \text{ \AA}$   $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Также ПАВ оказывает негативное влияние на скорость гидратации силикатных составляющих цемента и интенсивность формирования новообразований (гидроксида кальция). Если учесть, что силикатные фазы в цементном камне являются основными носителями прочности, то следует снижать содержание пенообразующей добавки в растворной смеси.

Результаты проведенных исследований показывают, что степень гидратации цемента существенно зависит от количества применяемых ПАВ. Об этом свидетельствует тот факт, что при повышенном содержании добавки уменьшается интенсивность линий от продуктов реакции гидратации и увеличивается интенсивность линий, отнесенных к фазе алита. При этом пенообразователь влияет преимущественно на количественный фазовый состав цементного камня. Качественный состав гидратных фаз остается постоянным независимо от содержания добавки.

**Выводы.** Среди большого разнообразия пенообразователей для пенобетонных необходимо отдавать предпочтение добавкам, позволяющим получать устойчивую пену при минимальной концентрации, что положительно скажется как на процессах структурообразования пенобетонной массы, так и на эксплуатационных характеристиках конечного продукта.

#### Список литературы

1. Цветков, Н.А. Структурообразование цементного камня с добавкой термомодифицированного торфа / Н.А. Цветков, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко, И.А. Прищепа, О.А. Зубкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – №12. – С. 52–61.
2. Дятков, Е.М. Тугоплавкие теплоизоляционные материалы, полученные способами пено- и газообразования / Е.М. Дятков, С.А. Гайлевич, Г.Я. Миненкова, С.Л. Радченко // Стекло и керамика. – 2002. – № 2. – С. 20–23.
3. Касимова, М.Т. Оптимизация рецептуры и свойств неавтоклавного фибробетона / М.Т. Касимова, Н.А. Дынкайбаева // Материалы МНПК «Современные технологии в строительстве, теплоснабжении и энергообеспечении». – Саратов : Амирит, 2015. – С. 101–107.
4. Бартеньева, Е.А. Исследование свойств модифицированного пенобетона / Е.А. Бартеньева, Н.А. Машкин // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 36–40.
5. Иванов, И.А. Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона / И.А. Иванов, В.М. Жмыхов // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 33–34.
6. Безбородов, В.Г. К вопросу об устойчивости минерализованных пен для получения материалов ячеистой структуры / В.Г. Безбородов, В.Ф. Завадский, Т.Ю. Никулина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – №12. – С. 29–33.
7. Черкасов, В.Д. Повышение пластической прочности пенобетона, получаемого из сухих смесей / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, А.И. Емельянов, Е.В. Киселев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 10. – С. 32–37.
8. Бартеньева, Е.А. Формирование устойчивой пенной структуры в технологии пенобетона / Е.А. Бартеньева, Л.В. Ильина, И.М. Себелев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 10. – С. 87–98.
9. Черкасов, В.Д. Пенообразователь из продуктов микробного синтеза для получения пенобетонных / В.Д. Черкасов, А.И. Емельянов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019 – №12. – С. 24–31.
10. Ларионова, З.М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня / З.М. Ларионова, Л.В. Никитина, В.Р. Гаранин. – Москва : Стройиздат, 1977. – 159 с.

## References

1. Tsvetkov, N.A. Structure formation of cement stone with the addition of thermally modified peat / N.A. Tsvetkov, Yu.S. Sarkisov, N.P. Gorlenko, I.A. Prishchepa, O.A. Zubkova // News of higher educational institutions. Construction. – 2018. – No. 12. – P. 52–61.
2. Dyatkov E.M. Refractory heat-insulating materials obtained by foam and gas generation methods / E.M. Dyatkov, S.A. Gailevich, G.Ya. Minenkova, S.L. Radchenko // Glass and ceramics. – 2002. – No. 2. – P. 20–23.
3. Kasymova, M.T. Optimization of the formulation and properties of non-autoclaved fiber-reinforced aerated concrete / M.T. Kasymova, N.A. Dynkaybaeva // Proceedings of the Scientific and Production Complex «Modern Technologies in Construction, Heat Supply and Energy Supply». – Saratov : Amirit, 2015. – P. 101–107.
4. Bartenyeva, E.A. Study of the properties of modified foam concrete / E.A. Bartenyeva, N.A. Mashkin // Construction materials. – 2017. – No. 10. – P. 36–40.
5. Ivanov, I.A. Evaluation of the properties of synthetic foaming agents for foam concrete / I.A. Ivanov, V.M. Zhmykhov // Construction materials. – 2007. – No. 7. – P. 33–34.
6. Bezborodov, V.G. On the issue of the stability of mineralized foams for obtaining materials with a cellular structure / V.G. Bezborodov, V.F. Zavadskiy, T.Yu. Nikulina // News of higher educational institutions. Construction. – 2002. – No. 12. – P. 29–33.
7. Cherkasov, V.D. Increasing the plastic strength of foam concrete obtained from dry mixes / V.D. Cherkasov, V.I. Buzulukov, A.I. Emelianov, E.V. Kiselev // News of higher educational institutions. Construction. – 2017. – No. 10. – P. 32–37.
8. Bartenyeva, E.A. Formation of a stable foam structure in foam concrete technology / E.A. Bartenyeva, L.V. Ilyina, I.M. Sebelev // News of higher educational institutions. Construction. – 2024. – No. 10. – P 87–98.
9. Cherkasov, V.D. Foaming agent from microbial synthesis products for obtaining foam concrete / V.D. Cherkasov, A.I. Emelianov // News of higher educational institutions. Construction. – 2019. – No. 12. – P. 24–31.
10. Larionova, Z.M. Phase composition, microstructure and strength of cement stone / Z.M. Larionova, L.V. Nikitina, V.R. Garanin. – Moscow : Stroyizdat, 1977. – 159 p.

УДК 692.115:691.4

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_11

**ООО НПП «Геотек»**Россия, 440004, г. Пенза,  
ул. Центральная, стр. 1М,  
тел.: (8800) 200-16-05**Идрисов Илья Хамитович,**  
кандидат технических наук,  
генеральный директор**Иванов Антон Владимирович,**  
инженер-исследователь*Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет*  
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург,  
2-я Красноармейская ул., д. 4,  
тел.: (812) 575-05-34; факс (812) 316-58-72**Болдырев Геннадий Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор-  
консультант кафедры «Геотехника»*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**Макридин Николай Иванович,**  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник научно-исследовательского сектора**NPP Geotek LLC**Russia, 440004, Penza,  
building 1M, Tsentralnaya St.,  
tel.: (8800) 200-16-05**Idrisov Ilya Khamitovich,**  
Candidate of Sciences, General Director**Ivanov Anton Vladimirovich,**  
Research Engineer*Saint Petersburg State University of  
Architecture and Civil Engineering*  
Russia, 190005, Saint Petersburg,  
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St.,  
tel.: (812) 575-05-34; fax (812) 316-58-72**Boldyrev Gennady Grigorievich,**  
Doctor of Sciences, Consultant Professor at  
the Department «Geotechnics»*Penza State University of Architecture  
and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Makridin Nikolai Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Chief Researcher of the  
Scientific Research Sector

## МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГРУНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

И.Х. Идрисов, Г.Г. Болдырев, А.В. Иванов, Н.И. Макридин

Описаны приборы и устройства для испытаний в лабораторных и полевых условиях дисперсных и мерзлых грунтов для оснований зданий и сооружений. Приведена классификация методов испытаний грунтов при статическом и динамическом нагружении. Рассмотрены практический пример статистической обработки данных испытаний и их использование при построении цифровой инженерно-геологической модели.

*Ключевые слова: приборы, испытания грунтов, траектории напряжений, цифровая модель, основные статистики, вероятность распределения*

## METHODS AND DATA PROCESSING FOR TESTING THE SOILS FOR BUILDINGS AND STRUCTURES FOUNDATIONS

I.Kh. Idrisov, G.G. Boldyrev, A.V. Ivanov, N.I. Makridin

Instruments and devices for testing dispersed and frozen soils for the foundations of buildings and structures in laboratory and field conditions are considered. A classification of soil testing methods under static and dynamic loading is given. A practical example of statistical processing of test data and their use in constructing a digital engineering and geological model is considered.

*Keywords: instruments, soil testing, stress trajectories, digital model, basic statistics, probability of distribution*

В настоящее время в Российской Федерации полностью завершен процесс импортозамещения иностранного оборудования для обследования и испытания грунтов отечественным ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru), [www.geotest.ru](http://www.geotest.ru), [www.stabilometr.ru](http://www.stabilometr.ru)). Качество и возможности российского оборудования сравнимы с продукцией различных зарубежных фирм. Основной объем выпускаемого измерительного и испытательного оборудования в России включает компрессионные приборы, приборы одноплоскостного среза и приборы трехосного сжатия для испытаний грунтов в лабораторных условиях. Для испытаний в полевых условиях наибольшее применение находят устройства статического зондирования и устройства для испытаний плоским и винтовым штампами.

Испытания в условиях трехосного сжатия проводятся с целью определения характеристик прочности и деформируемости, которые приведены в табл. 1. В зависимости от вида определяемой механической характеристики принимается тот или иной тип испытаний [1, 2].

Т а б л и ц а 1

Тип и условия испытаний, определяемые параметры

Тип испытаний	Применяемые стандарты	Условия испытаний	Определяемые параметры
Неконсолидированно-недренированные (НН-испытания)	ГОСТ 12248–2020, ASTM D 2850–23, BS 1737-7, ISO 17892-8:2018	Без измерения порового давления	Недренированная прочность $c_u$
Консолидированно-недренированные (КН-испытания)	ГОСТ 12248–2020, ASTM D 4767–11, BS 1737-8	С измерением или без измерения порового давления	Параметры прочности в полных или эффективных напряжениях: $\varphi$ , $c$ , $\varphi'$ , $c'$
Консолидированно-дренированные (КД-испытания)	ГОСТ 12248–2020, ISO 17892-9:2018	Без измерения порового давления	Параметры прочности в полных напряжениях: $\varphi$ , $c$ Модуль упругости и модуль общей деформации: $E_e$ , $E$

Трехосные испытания проводятся с образцами грунта цилиндрической формы диаметром от 38 до 100 мм при высоте 76 и 200 мм соответственно. Для крупнообломочных, гравийных грунтов диаметр образца может быть равен 300 или более миллиметров. На рис. 1 показано универсальное устройство силового нагружения для испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия, одноосного сжатия и компрессионного сжатия.

Так как прочность грунтов и в меньшей степени деформируемость зависят от вида напряженного состояния, возникающего в основании при различных внешних условиях силового нагружения, то испытания проводят по различным траекториям напряжений, которые имеют место в основании зданий и сооружений. На рис. 2 показаны зоны напряженного состояния, где грунт испытывает различные условия силового нагружения – от условий простого сдвига DSS до условий трехосного сжатия STC, трехосного расширения STE и компрессионного сжатия CC.

Реализация условий динамического нагружения при различной частоте и амплитуде колебаний возможна в приборах второго типа, образцы которых показаны на рис. 3.





Рис. 1. Общий вид комплекта оборудования для испытаний при различном силовом нагружении ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

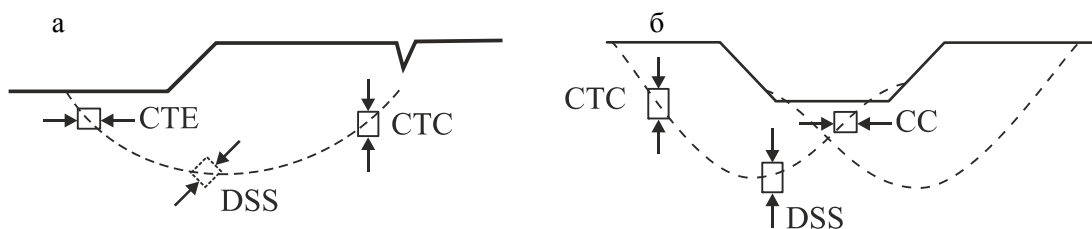


Рис. 2. Примеры напряженного состояния в различных точках основания при статическом нагружении:

а – насыпь; б – выемка;

DSS – прямой сдвиг; CTC – трехосное сжатие;

CTE – трехосное расширение; CC – компрессионное сжатие

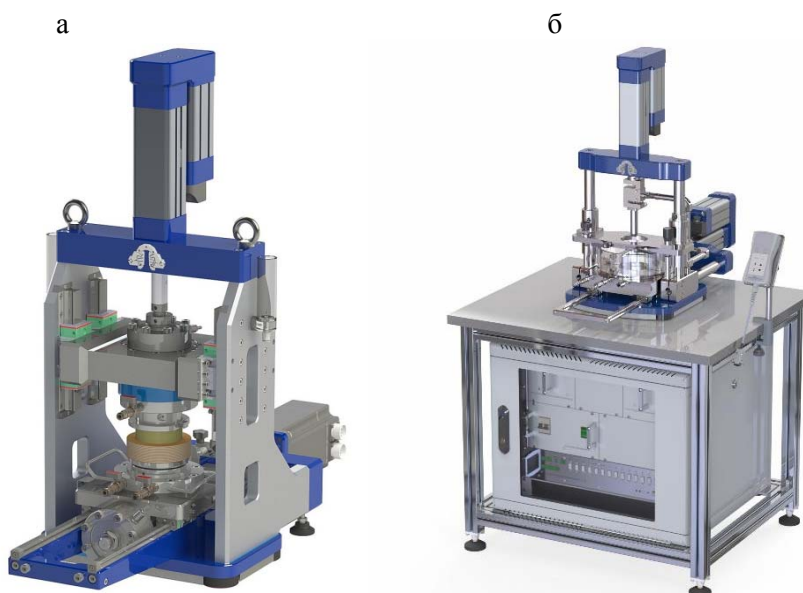


Рис. 3. Приборы для динамических испытаний:

а – одноплоскостной срез; б – простой сдвиг ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

Для исследований свойств вечномёрзлых грунтов наиболее часто используются следующие методы лабораторных испытаний: одноосное сжатие; компрессионное

сжатие; одноплоскостной срез; трехосное сжатие; испытания на растяжение; испытания на ползучесть и релаксацию напряжений; испытания на морозное пучение; испытания при замораживании и оттаивании; испытания шариковым штампом. Пример одного из подобных приборов показан на рис. 4. Подобные приборы разработаны для испытаний при высокой положительной температуре (до 180 °С).



Рис. 4. Прибор трехосного сжатия для испытаний пластично-мерзлых грунтов ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

Одним из информативных методов полевых испытаний является статическое зондирование (рис. 5). В отличие от других методов полевых испытаний данный метод позволяет проводить оценку свойств грунтов с произвольным, достаточно малым шагом по глубине, например 5 см [3]. Выборка данных в этом случае может включать сотни значений по глубине зондирования, что позволяет обоснованно использовать статистический анализ данных при их обработке. Используя соответствующие корреляционные уравнения, можно построить профили физических и механических характеристик грунтов (рис. 6, 7).

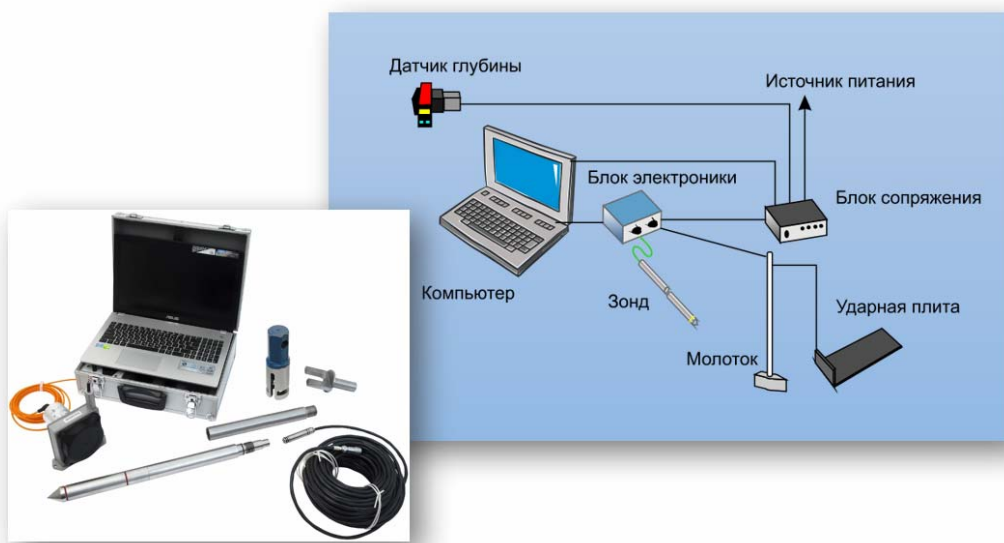


Рис. 5. Комплект устройств для испытаний статическим зондированием ([www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru))

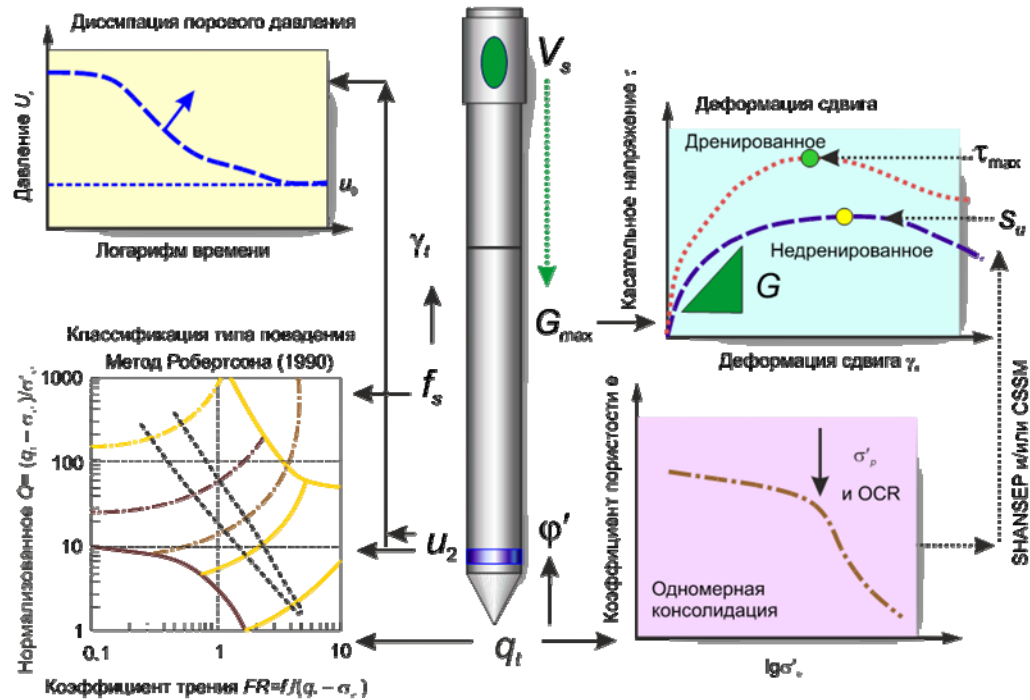


Рис. 6. Параметры зондирования и анализ данных (www.geotek-bim.ru)

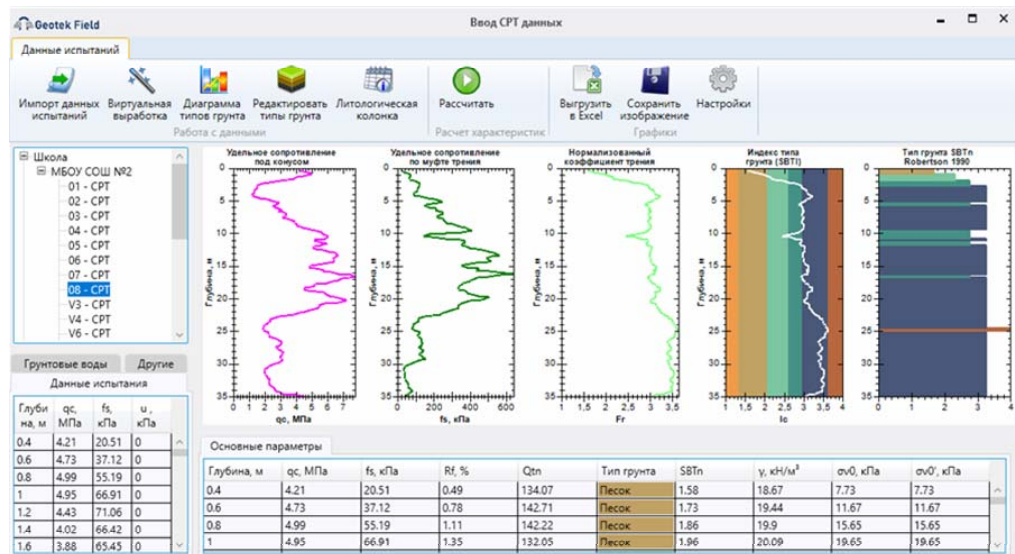


Рис. 7. Пример визуализации данных зондирования (www.geotek-bim.ru)

В результате лабораторных и полевых испытаний грунтов мы получаем выборку данных, достаточную для последующей статистической обработки и построения расчетного грунтового элемента [5]. Совокупность расчетных грунтовых элементов толщи исследуемых грунтов представляет собой геомеханическую модель. Пример подобной модели склона показан на рис. 8.

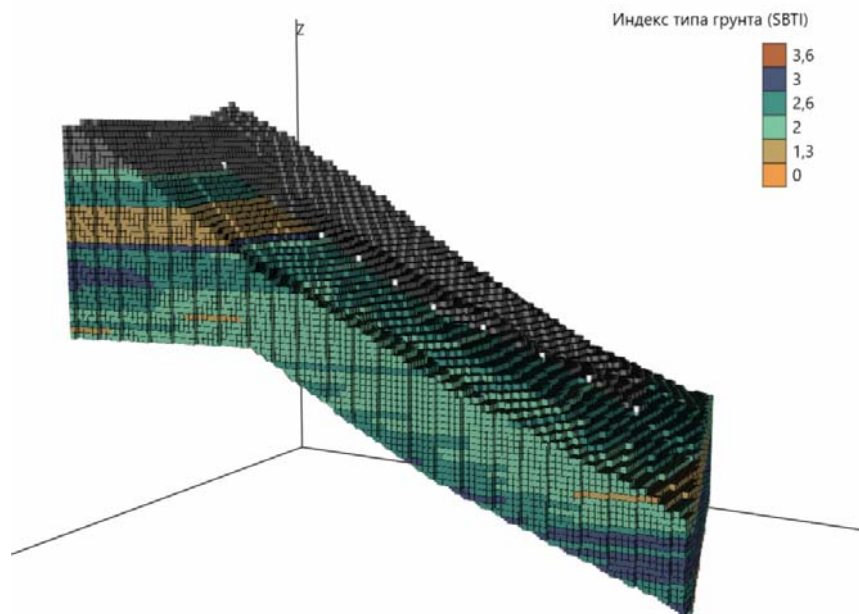


Рис. 8. Трехмерная модель склона. Элементы сетки размером  $1 \times 1 \times 1$  м

Статистический и пространственный анализ свойств грунтов включает следующие этапы:

Этап 1. Определение статистик второго момента: среднее значение, среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент корреляции.

Этап 2. Выбор функции распределения вероятности. Определяется тип распределения вероятностей для различных характеристик грунтов.

Этап 3. Корреляция свойств грунта. Разрабатываются зависимости между характеристиками грунтов и измеренными параметрами зондирования (удельные силы сопротивления конуса и удельные силы трения), оценивается достоверность применения глобальных эмпирических зависимостей [4, 6] к местным инженерно-геологическим условиям.

Этап 4. Пространственная изменчивость. Может быть определена с использованием лабораторных данных и/или данных статического зондирования и вероятностных методов [7].

Рассмотрим процедуру статистического анализа результатов измерений, полученных методом зондирования (СРТ). Для оценки устойчивости склона было проведено девять СРТ-испытаний и построена трехмерная цифровая модель грунта (см. рис. 8). Методика построения цифровой геотехнической модели подробно рассмотрена в [4], а программа для ее построения Geotek Field доступна на сайте [www.geotek-bim.ru](http://www.geotek-bim.ru).

Свойства грунтов получены методом статического зондирования с использованием корреляционных уравнений СП 446.1325800.2019 и других авторов. Пример построения профилей параметров зондирования на одной из выработок показан на рис. 7.

В табл. 2 приведены данные статистического анализа свойств грунтов на девяти опорных СРТ-выработках. В табл. 2, 3 используются обозначения:  $n$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $Cov$  – размер выборки, среднеквадратичное отклонение, среднее значение и коэффициент вариации соответственно.

Результаты лабораторных и полевых испытаний показывают, что большинство характеристик грунтов можно рассматривать как случайные величины, имеющие нормальное или логнормальное распределение [7, 8, 9]. Однако известно, что наиболее подходящие распределения вероятностей для физических и механических характеристик грунтов в первую очередь зависят как от набора данных, так и – в значительной степени – от типа грунта и его генезиса. Из-за того что распределения вероятностей зависят как от вида определяемой характеристики грунта, так и от

конкретного участка, невозможно выбрать заранее наиболее подходящий вид функции плотности вероятности – нормальный или логнормальный. Поэтому первоначально следует определить вид вероятностного распределения той или иной характеристики грунта, а затем выполнить статистический анализ данных.

Т а б л и ц а 2

Основные статистики характеристик грунтов на опорных выработках

Вид грунта	Характеристика	$\mu$	$\sigma$	$Cov$	$n$
Супесь-пылеватый песок. ИГЭ-1	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.76	0.72	3.644	77
	$c$ , кПа	11	29.704	-	77
	$\phi$ , град	30	3.085	10.031	77
Суглинок ИГЭ-2	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.22	0.566	2.943	306
	$c$ , кПа	26	13.099	48.925	306
	$\phi$ , град	21	3.05	14.3	306
Песок ИГЭ-3	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.72	0.4	2.028	318
	$c$ , кПа	-	-	-	318
	$\phi$ , град	35	31.42	1.66	318
Глина ИГЭ-4	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.69	0.582	2.954	486
	$c$ , кПа	42	3.859	9.186	486
	$\phi$ , град	20	1.543	7.417	486

На рис. 9 показан пример определения вида функции плотности распределения вероятности данных удельного веса для глины из табл. 2. Как видим в данном случае, логнормальный и нормальный законы распределения показывают одинаковое вероятностное распределение.

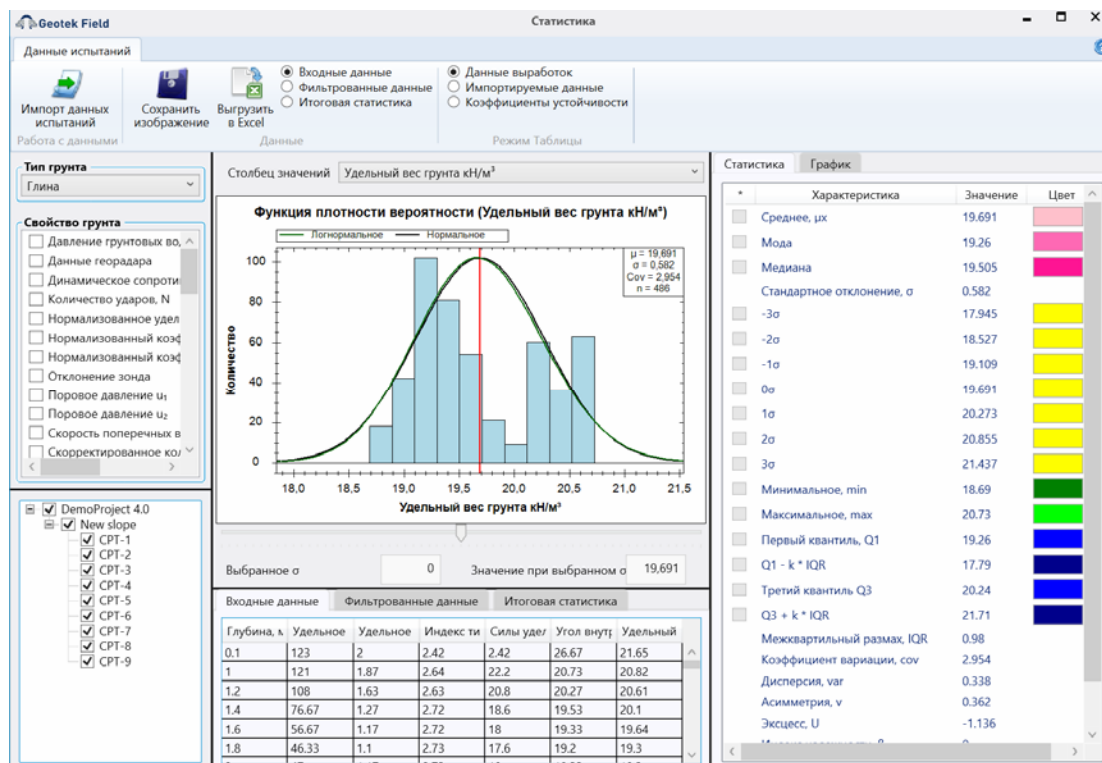


Рис. 9. Пример статистической обработки выборки удельного веса глины

После статистического анализа данных на девяти выработках можно перейти к определению характеристик грунтов в необследованных местах, в местах вне опорных выработок (табл. 3). Для этого исследуемый массив грунта разбиваем на кубические элементы и, используя, например, сферическую вариограмму, находим характе-



ристики грунтов [7]. Затем выполняем статистический анализ новых данных, но уже не на опорных выработках, а в трехмерном массиве грунта в каждом элементе кубической сетки (см. рис. 8). Как видно из табл. 2, выборка данных в каждом ИГЭ существенно увеличилась, а значения коэффициента вариации несколько уменьшились по сравнению с начальными опорными значениями (см. табл. 1), и их значения не превышают нормативных величин по ГОСТ 20522–2012.

Таблица 3

Основные статистики

Вид грунта	Характеристика	$\mu$	$\sigma$	$Cov$	$n$
Супесь-пылеватый песок. ИГЭ-1	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.31	0.355	1.838	147806
	$c$ , кПа	51	24.056	46.91	147806
	$\phi$ , град	29	2.463	8.485	147806
Суглинок. ИГЭ-2	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.47	0.378	1.944	124082
	$c$ , кПа	44	15.083	34.554	124082
	$\phi$ , град	24	2.572	10.664	124082
Песок. ИГЭ-3	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.26	0.531	2.76	56502
	$c$ , кПа	61	31.525	51.281	56502
	$\phi$ , град	34	1.727	3.222	56502
Глина. ИГЭ-4	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	19.70	0.321	1.628	106115
	$c$ , кПа	44	4.212	9.483	106115
	$\phi$ , град	21	1.402	6.447	106115

Используя вновь сгенерированные характеристики грунтов, но полученные с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов, можно построить разрезы трехмерной модели. На рис. 10 показан разрез по выработкам СТР-1 – СРТ-9.

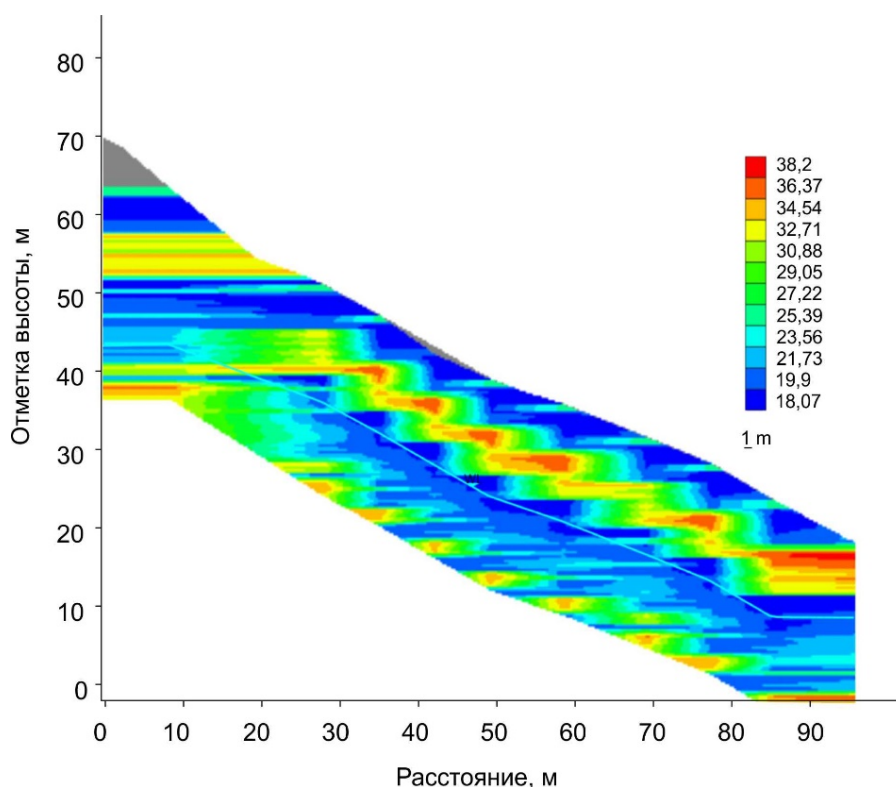


Рис. 10. Поле распределения угла внутреннего трения по разрезу через выработки на трехмерной модели

Далее, используя трехмерную модель, можно выполнить соответствующие расчеты той или иной из задач геотехники. Пример подобных расчетов можно найти в [4].

#### В ы в о д ы .

1. Разработанные и выпускаемые в РФ приборы и устройства для полевых и лабораторных испытаний грунтов позволяют определить характеристики/параметры грунтов для расчета оснований зданий и сооружений как по предельным состояниям сводов правил, так и с использованием численных методов расчета.

2. Выбор типа оборудования для испытаний грунтов определяется как видом напряженного состояния в основании проектируемого объекта, так и видом решаемой задачи геотехники.

3. Наиболее информативным методом исследования как стратиграфии, так и свойств грунтов является статическое зондирование. Используя данные зондирования, сравнительно просто построить трехмерную цифровую инженерно-геологическую модель, а затем выполнить соответствующие расчеты оснований.

#### Список литературы

1. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. С комментариями к ГОСТ 12248–2010 / Г.Г. Болдырев. – Москва : ООО «Прондо», 2014. – 812 с.
2. Болдырев, Г.Г. Методы определения динамических свойств грунтов / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов. – Москва : ООО «Прондо», 2018. – 88 с.
3. Болдырев, Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования / Г.Г. Болдырев. – Москва : ООО «Прондо», 2017. – 476 с.
4. Болдырев, Г.Г. Инженерно-геологические исследования с использованием цифровых технологий / Г.Г. Болдырев, Д.А. Луковкин, П.А. Анохин, Г.А. Новичков, О.В. Хрянина // Инженерные изыскания. – 2022. – Т. XVI, № 3. – С. 12–32.
5. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва, 2012.
6. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – Москва, 2019.
7. Baecher, G.B. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering / G.B. Baecher, J.T. Christian. – Chichester, UK: Wiley, 2003.
8. Elkateb, T. An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems / T. Elkateb, R. Chalaturnyk, P.K. Robertson // Canadian Geotechnical Journal. – 2003. – No.40. – P. 1–15.
9. Lumb, P. The Variability of Natural Soils / P. Lumb // Canadian Geotechnical Journal. – 1966. – Vol. 3, No. 2. – P. 74–79.

#### References

1. Boldyrev, G.G. Methods for determining the mechanical properties of soils. With comments to GOST 12248-2010 / G.G. Boldyrev. – Moscow : ООО «Prondo», 2014. – 812 p.
2. Boldyrev, G.G. Methods for determining the dynamic properties of soils / G.G. Boldyrev, I.Kh. Idrisov. – Moscow ООО «Prondo», 2018. – 88 p.
3. Boldyrev G.G. Guidelines for the interpretation of test data by static and dynamic sensing methods for geotechnical design / G.G. Boldyrev. – Moscow : ООО «Prondo», 2017. – 476 p.
4. Boldyrev, G.G. Engineering and geological research using digital technologies / G.G. Boldyrev, D.A. Lukovkin, P.A. Anokhin, G.A. Novichok, O.V. Khryanina // Engineering surveys. – 2022. – Vol. XVI, No. 3. – P. 12–32.
5. GOST 20522-2012. Soils. Methods of statistical processing of test results. – Moscow, 2012.

6. SP 446.1325800.2019. Engineering and geological surveys for construction. General rules of work. – Moscow, 2019.
7. Baecher, G.B. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering / G.B. Baecher, J.T. Christian. – Chichester, UK: Wiley, 2003.
8. Elkateb, T. An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems / T. Elkateb, R. Chalaturnyk, P.K. Robertson // Canadian Geotechnical Journal. – 2003. – No.40. – P. 1–15.
9. Lumb, P. The Variability of Natural Soils / P. Lumb // Canadian Geotechnical Journal. – 1966. – Vol. 3, No. 2. – P. 74–79.



УДК 691.3

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_21

Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)  
Россия, 308012, Белгород,  
ул. Костюкова, д. 46,  
тел. (4722) 55-15-91

**Лесовик Валерий Станиславович**,  
заслуженный деятель РФ, доктор технических  
наук, профессор, зав. кафедрой «Строительное  
материаловедение, изделия и конструкции»,  
член-корреспондент РААСН  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Сальникова Алёна Сергеевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретическая механика  
и сопротивление материалов»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Дудченко Валерия Александровна**,  
ассистент кафедры «Теоретическая  
механика и сопротивление материалов»  
E-mail: dudchenko.v.a@yandex.ru

Belgorod State Technological University  
named after V.G. Shukhov  
(BSTU named after V.G. Shukhov)  
Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,  
tel. (4722) 55-15-91

**Lesovik Valery Stanislavovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Construction Materials Science,  
Products and Structures», Corresponding  
member to RAASN  
E-mail: naukavs@mail.ru

**Salnikova Alyona Sergeevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Theoretical Mechanics and  
Strength of Materials»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Dudchenko Valeria Aleksandrovna**,  
Assistant Professor of the Department  
«Theoretical Mechanics and Strength of  
Materials»  
E-mail: dudchenko.v.a@yandex.ru

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда  
(проект №25-19-00866), с использованием оборудования Центра высоких технологий  
БГТУ им. В.Г. Шухова.

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТОВ РЕЦИКЛИНГА КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

В.С. Лесовик, А.С. Сальникова, В.А. Дудченко

В современных условиях важной задачей строительной отрасли является повышение энергоэффективности, улучшение экологической обстановки и рациональное использование техногенного сырья. Значительную долю строительных отходов составляет бой керамического кирпича, полученный в результате разрушений. Его вторичное использование в производстве композиционных вяжущих позволяет снизить нагрузку на окружающую среду и получить качественные строительные материалы.

В ходе исследований было выявлено, что продукты переработки керамического кирпича демонстрируют высокую способность к измельчению: за 2 минуты помола их удельная поверхность достигает 350 м<sup>2</sup>/кг, через 5 минут – 550 м<sup>2</sup>/кг, а через 20 минут – 1088 м<sup>2</sup>/кг.

Введение в цементную составляющую минеральной добавки из продуктов рециклинга керамического кирпича с удельными поверхностями 350 и 610 м<sup>2</sup>/кг в количестве 5 % способствует повышению прочности цементного камня на 19-20 %, а минеральная добавка с удельной поверхностью 1000 м<sup>2</sup>/кг, применяемая в более высоких дозировках, позволяет увеличить прочность до 60 %.

*Ключевые слова:* композиционное вяжущее, минеральная добавка, рециклинг керамического кирпича, гранулометрический состав, цементный камень

## DEVELOPMENT OF COMPOSITE BINDERS USING CERAMIC BRICK RECYCLING PRODUCTS

V.S. Lesovik, A.S. Salnikova, V.A. Dudchenko

In modern conditions an important task of the construction industry is to increase energy efficiency, improve the environmental situation and rational use of man-made raw materials. A

significant proportion of construction waste is made up of ceramic brick waste resulting from destruction. Its secondary use in the production of composite binders makes it possible to reduce the environmental burden and obtain high-quality building materials.

In the course of research it was revealed that ceramic brick processing products demonstrate a high ability to grind: in 2 minutes of grinding, their specific surface area reaches  $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ , and after 5 minutes –  $550 \text{ m}^2/\text{kg}$ , after 20 minutes –  $1088 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

The introduction of a mineral additive from ceramic bricks with specific surfaces of 350 and  $610 \text{ m}^2/\text{kg}$  in an amount of 5 % into the cement component increases the strength of cement stone by 19-20 %, and with a specific surface of  $1000 \text{ m}^2/\text{kg}$ , used in higher dosages, increases the strength by 60 %.

*Keywords: composite binder, mineral supplement, recycling of ceramic bricks, granulometric composition, cement stone*

**Введение.** В современных условиях ключевыми направлениями развития строительной отрасли являются энергосбережение, улучшение экологической обстановки и эффективное использование техногенного сырья [1-3]. Особую значимость приобретает проблема переработки разрушенных фрагментов зданий и сооружений, которые могут служить вторичным сырьем для восстановления жилья, в том числе в новых регионах Российской Федерации. Это актуально как с точки зрения экономии природных ресурсов, так и с позиции снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Как известно [4], определенная часть отходов составляет строительный лом в виде бетонного и кирпичного боя (около 27 % от общего объема отходов). Если учесть некондиционную продукцию (брак и прочие отходы) заводов ЖБИ, данный показатель увеличивается еще больше. Если вести анализ по отдельным территориям, то, например, вблизи границ с Украиной имеются города и села, где в связи с военными боевыми действиями были повреждены дома, что, в свою очередь, привело к увеличению количества строительного мусора.

Одним из перспективных решений проблемы утилизации строительного лома является его вторичное использование в практике строительного материаловедения, в частности в технологии бетона (в качестве заполнителей) и вяжущих веществ (в качестве минеральной добавки).

Установлено, что эффективное применение строительного лома по назначению возможно и целесообразно после его активизации [5], выполненной механическим или механохимическим путем, в зависимости от вещественного и химического составов и необходимого конечного результата. К тому же таким способом можно получить вторичный мелкий и крупный заполнитель (для бетона) и минеральную добавку (для композиционных вяжущих). Естественно, многокомпонентное техногенное сырье в виде строительного лома будет иметь свои особенности для технологий его переработки и вторичного использования в производстве новых строительных материалов [6-9].

При восстановлении объектов или возведении новых нужно применять материалы, которые имеют максимальную совместимость, т.е. основываться на законе сродства структур [10]. Согласно ему, при использовании материалов необходимо учитывать сродство применяемых материалов, их сочетаемость и их предпосылки к созданию надежного контакта, это все способствует получению лучшей адгезии компонентов конгломерата, конструкции, что, в свою очередь, повышает ее надежность и долговечность.

Авторы [11] отмечают, что закон сродства структур также хорошо зарекомендовал себя во многих видах строительства, реализация этого закона обеспечивает формирование высокоорганизованной структуры материала, что напрямую влияет на его эксплуатационные характеристики, а также предотвращает основные недостатки при монолитном строительстве, а именно неравномерность структуры, низкую адгезию и склонность к деформациям. Это открывает путь к созданию «интеллектуальных» материалов с заданными свойствами, сочетающих высокую прочность, долговечность и способность к адаптации в изменчивых условиях эксплуатации, в соответствии с теорией техногенного метасоматоза [12].

Керамический кирпич всегда имел большой спрос у потребителей и застройщиков, у него хорошие физико-механические свойства, а главное он обладает высокими теплоизоляционными характеристиками, поэтому из него продолжают возводить дома. Поэтому целью нашего исследования являлся анализ характеристик кирпичного боя, нахождение рациональных дозировок минеральной добавки, полученной из него, и входящих в состав композиционных вяжущих, а также определение влияния удельной поверхности на прочность цементного камня.

Для выявления данных критериев в исследовании были проведены анализ гранулометрического состава минеральных добавок на основе боя керамического кирпича, изучение кинетики его измельчения, а также химический анализ для определения основных компонентов. Кроме того, оценивалось влияние удельной поверхности тонкомолотого боя керамического кирпича и его дозировки на прочностные характеристики цементного камня.

**Результаты и анализ.** Отходы боя керамического кирпича (БКК) планируется использовать в качестве минеральной добавки при производстве композиционного вяжущего, поэтому необходимо было определиться, до какой удельной поверхности следует молоть БКК. Для выявления более рациональной удельной поверхности минеральных добавок, полученных из продуктов рециклинга боя керамического кирпича, был произведен помол БКК в шаровой мельнице до удельных поверхностей 350 и 1000 м<sup>2</sup>/кг, для этого использовали фракции 1,25 и менее.

Для получения минеральных добавок необходима оценка их размолоспособности, так как если материал быстро измельчается, то снижаются затраты на электроэнергию. Для сравнения размолоспособности минеральной добавки был осуществлен помол, контрольной точкой была установлена удельная поверхность 500 м<sup>2</sup>/кг, в качестве сравнения были взяты следующие материалы: портландцемент, кварцевый песок и строительные отходы, бой керамического кирпича, тяжелого бетона и газосиликата (рис. 1).

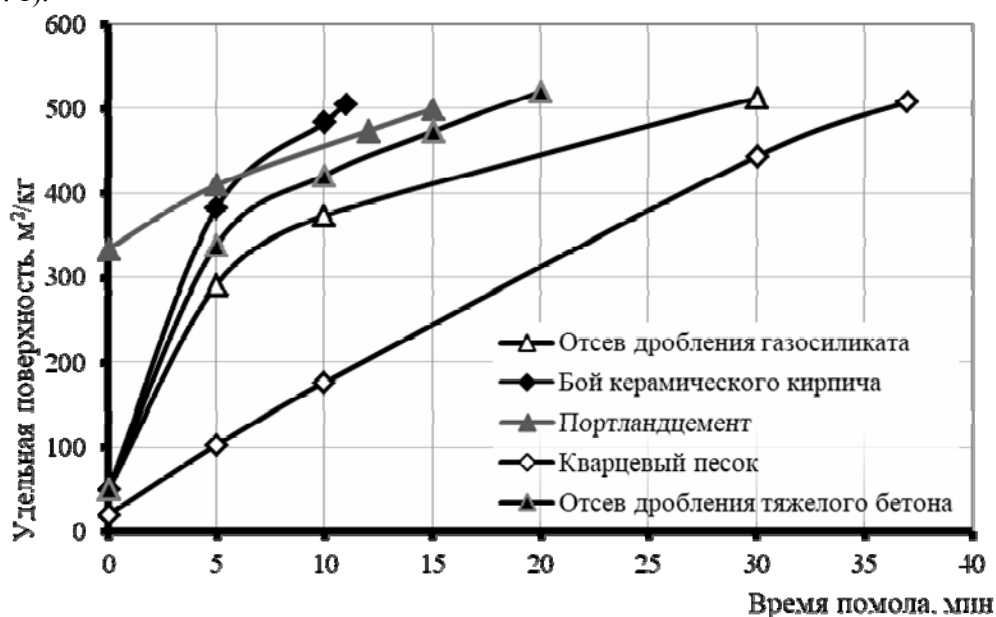


Рис. 1. Кинетика помола материалов

Как видно из рис. 1, в первые 5 минут все материалы показывают хорошую размолоспособность, лидером является бой керамического кирпича. Однако кварцевый песок с самого начала имеет плохую размолоспособность и при 5 минутах помола его удельная поверхность на 73 % меньше, чем БКК. Стоит отметить, что при увеличении времени помола разрыв между удельными поверхностями растет. Так, например, удельная поверхность 500 м<sup>2</sup>/кг минеральной добавки из БКК достигается за 11 минут, у минеральной добавки из отсева дробления тяжелого бетона – за 20 минут, а у песка – за 37 минут. Данное исследование подтверждает высокую размолоспособность

керамического кирпича и целесообразность его применения в качестве минеральной добавки, входящей в состав композиционного вяжущего бетона.

Проведенные испытания доказывают высокую размолоспособность отходов рециклинга керамического кирпича, а также то, что этот материал обладает небольшой твердостью, а для достижения высокой удельной поверхности ( $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) не требуется много времени (рис. 2).

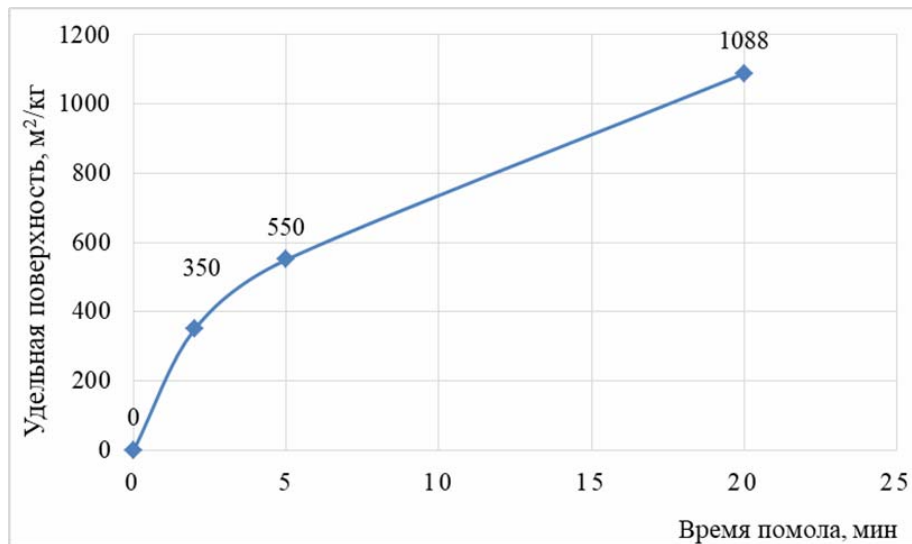


Рис. 2. Кинетика помола БКК

Как видно из рис. 2, бой керамического кирпича демонстрирует высокую размолоспособность: уже через 2 минуты помола его удельная поверхность достигает  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а через 5 минут —  $550 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Дальнейший рост происходит менее интенсивно, но к 20-минутной отметке значение возрастает до  $1088 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Это свидетельствует о высокой эффективности материала при длительном помоле. Такая динамика подтверждает целесообразность использования боя керамического кирпича в минеральной добавке при производстве композиционного вяжущего, особенно в случаях, где требуется достижение высоких показателей удельной поверхности за относительно короткий срок.

Для более детального изучения составляющих минеральных добавок, полученных из БКК с разными удельными поверхностями, была проведена оценка их гранулометрического состава (рис. 3). К тому же была получена минеральная добавка с удельной поверхностью  $610 \text{ м}^2/\text{кг}$  путем смешивания компонентов с удельными поверхностями  $350$  и  $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  (50/50%).

Анализируя гранулометрические составы минеральных добавок из керамического кирпича с удельными поверхностями  $350$ ,  $1000$  и  $610 \text{ м}^2/\text{кг}$  (см. рис. 3), можно сделать следующие выводы:

1. Количественная характеристика частиц:

- В пробе с удельной поверхностью  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$  наблюдается значительное количество частиц размером  $10\text{-}20 \text{ мкм}$  (пик дифференциальной кривой), что составляет около  $2 \%$  от объема. Однако доля частиц менее  $1 \text{ мкм}$  крайне мала ( $\sim 0,1 \%$ ).
- Для образца с удельной поверхностью  $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  большое значение имеют фракции менее  $1 \text{ мкм}$  (до  $3 \%$  от объема), которые указывают на высокую долю ультрамелких частиц. Частицы размером  $10\text{-}20 \text{ мкм}$  здесь менее выражены ( $\sim 0,5 \%$ ), что связано с более интенсивным помолом.
- График демонстрирует распределение частиц по размерам в диапазоне от  $0,1$  до  $1000 \text{ мкм}$ . На графике представлены интегральная кривая (в процентах объема) и дифференциальная кривая (частота встречаемости частиц определенного размера).

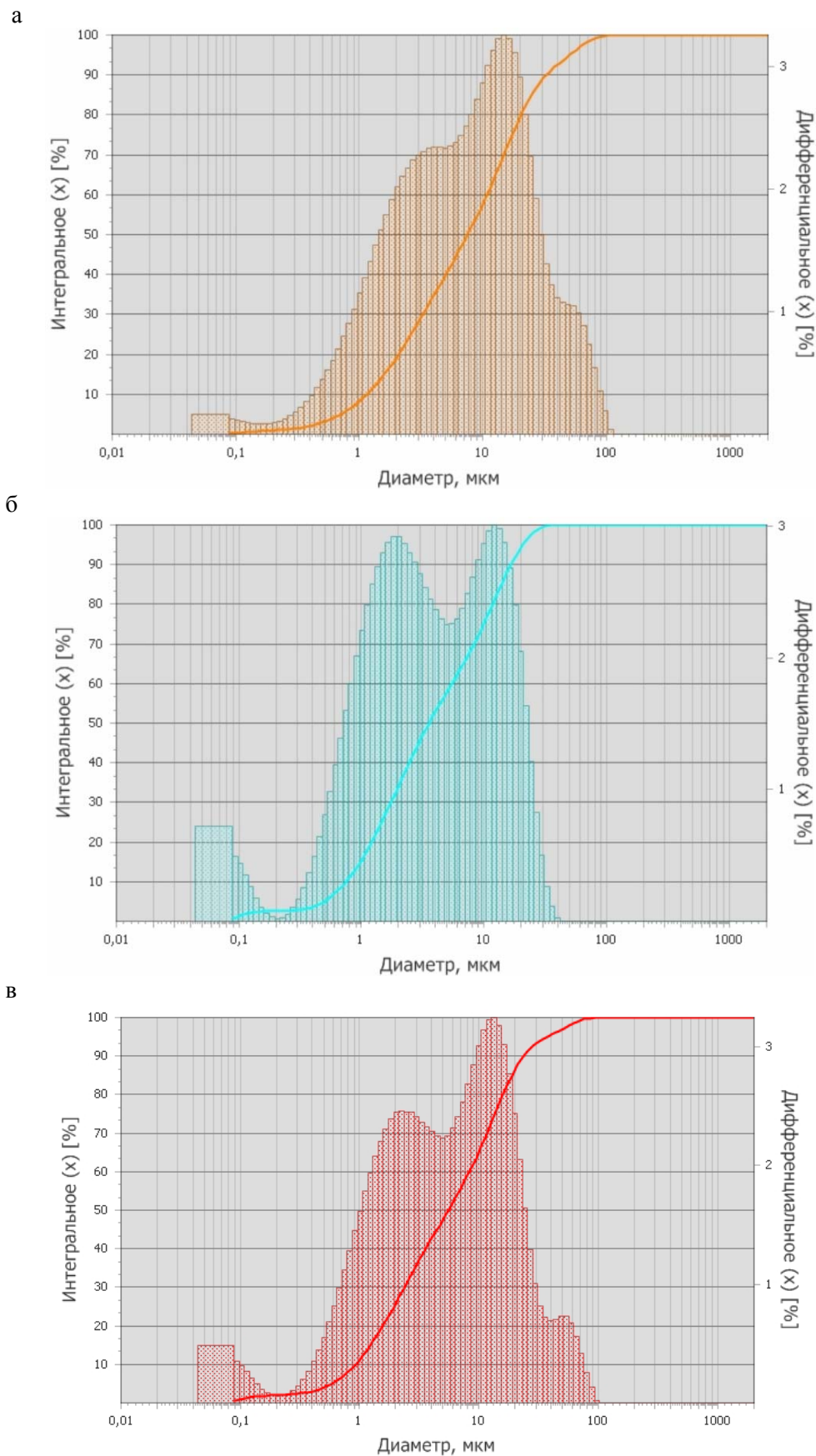


Рис. 3. Гранулометрический состав минеральных добавок из керамического кирпича:  
 а – удельная поверхность  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; б – удельная поверхность  $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;  
 в – удельная поверхность  $610 \text{ м}^2/\text{кг}$

## 2. Особенности кривых гранулометрического состава:

- Кривая для 350 м<sup>2</sup>/кг имеет «плато» в диапазоне 10-100 мкм, вероятно, из-за неравномерного распределения частиц после помола в мельнице с недостаточной энергоемкостью. Это может быть вызвано износом мелющих элементов или неполным разрушением крупных агрегатов.

- Кривая для 1000 м<sup>2</sup>/кг демонстрирует плавный переход от ультрамелких к крупным частицам без резких перепадов, что характерно для высокоэффективного помола с контролируемым распределением размеров.

- Дифференциальная кривая демонстрирует плавный переход между различными фракциями. Пик кривой находится в области 5-10 мкм, что является характерным для образца с удельной поверхностью 610 м<sup>2</sup>/кг. После пика кривая постепенно снижается, что указывает на уменьшение числа частиц с увеличением их размера.

Образец с удельной поверхностью 610 м<sup>2</sup>/кг, полученный смешиванием двух минеральных добавок, объединяет характеристики двух крайних случаев. Он демонстрирует баланс между ультрамелкими и средними частицами, сочетающий достаточную степень измельчения и равномерность распределения фракций. Это делает его потенциально подходящим для применений, где важны как прочностные свойства (за счет средних частиц), так и пластичность или плотность (благодаря ультрамелким частицам).

## 3. Влияние на свойства композиционного вяжущего:

- Увеличение доли частиц менее 1 мкм в образце с удельной поверхностью 1000 м<sup>2</sup>/кг повышает пластичность смеси за счет лучшего заполнения пор, однако избыток ультрамелких частиц, которые являются достаточно пористыми, может потребовать дополнительного расхода воды или добавок.

- В ранние сроки (3-7 суток) преимущество будет у образца 1000 м<sup>2</sup>/кг благодаря высокой реакционной способности ультрамелких частиц.

- Несмотря на большую долю крупных частиц в образце 350 м<sup>2</sup>/кг, его плотность может быть ниже из-за худшего заполнения пор по сравнению с равномерно распределенными частицами в образце 1000 м<sup>2</sup>/кг.

Увеличение удельной поверхности с 350 до 1000 м<sup>2</sup>/кг существенно изменяет гранулометрический состав: растёт доля ультрамелких частиц, что улучшает раннюю прочность и пластичность, но требует оптимизации рецептуры.

Исследование микроструктуры минеральной добавки из керамического кирпича проводилось с использованием оптической микроскопии при увеличении  $\times 100$  (рис. 4). Такой величины разрешение не дает подтверждения пористости материала, однако видно, что частицы имеют округлую форму разных размеров.

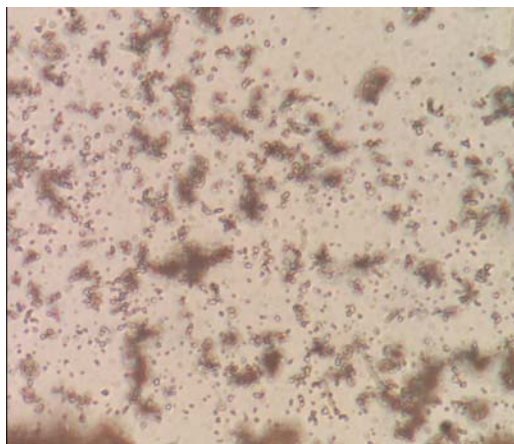


Рис. 4. Микроструктура тонкомолотого БКК при увеличении  $\times 100$

Анализ химического состава образца боя керамического кирпича выявил доминирование оксидов щелочноземельных и переходных металлов, а также кремния, характерных для традиционных керамических материалов.

Бой керамического кирпича рассматривается как перспективный вторичный материал для использования в качестве минеральной добавки в композиционном вяжущем, что приводит к сокращению расхода цемента. Установлено, что эффективность БКК напрямую зависит от удельной поверхности частиц и массовой доли в составе смеси. С увеличением удельной поверхности активизируются пуццолановые реакции, что способствует повышению прочностных характеристик и снижению пористости бетона.

Оптимальное содержание БКК обеспечивает улучшение технологических и эксплуатационных свойств материала. Однако превышение допустимой концентрации может привести к ухудшению механических показателей и увеличению водопоглощения. Таким образом, подбор рационального сочетания дисперсности и количества добавки является ключевым фактором при производстве композиционного вяжущего с использованием БКК.

Экспериментальным путем с помощью прибора Вика была определена нормальная плотность вяжущих с различной дозировкой минеральных добавок, полученных из КК: при 25 %  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=28,1 % и  $S_{уд}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=28,1 %; при 10 %  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=26,6 % и  $S_{уд}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=26,7 %; при 5 %  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=26,6 % и  $S_{уд}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$  – НГ=26,6 %; контрольный без добавки – НГ=26,6 %. Как видно из полученных данных, нормальная плотность вяжущих несильно различается, в связи с этим, для того чтобы наиболее ярко проследить физико-химические взаимодействия компонентов без влияния В/Ц и оценки влияния дозировки минеральной добавки и ее удельной поверхности на прочность цементного камня, было предусмотрено математическое планирование и подготовлены образцы с постоянным водоцементным отношением (В/Ц=0,35) и различным содержанием минеральной добавки: 5, 15 и 25 % от массы вяжущего.

Такое водоцементное отношение было принято по нескольким причинам: во-первых, водоцементное отношение является одним из самых сильных факторов, влияющих на прочность изделия, а целью работы было определить влияние химической добавки, и если воду приводить в норму, то непонятно будет, что влияет на полученные данные – наличие минеральной добавки или приведение к нормальной плотности. Во-вторых, для удобства укладки и отказа от вибрирования смеси.

В качестве вяжущего применялся портландцемент М500 группы компании Цемент (г. Старый Оскол). Стоит отметить, что минеральная добавка вводилась с заменой соответствующей части цемента. Данные параметры были выбраны исходя из предварительных исследований и практической применимости (см. таблицу).

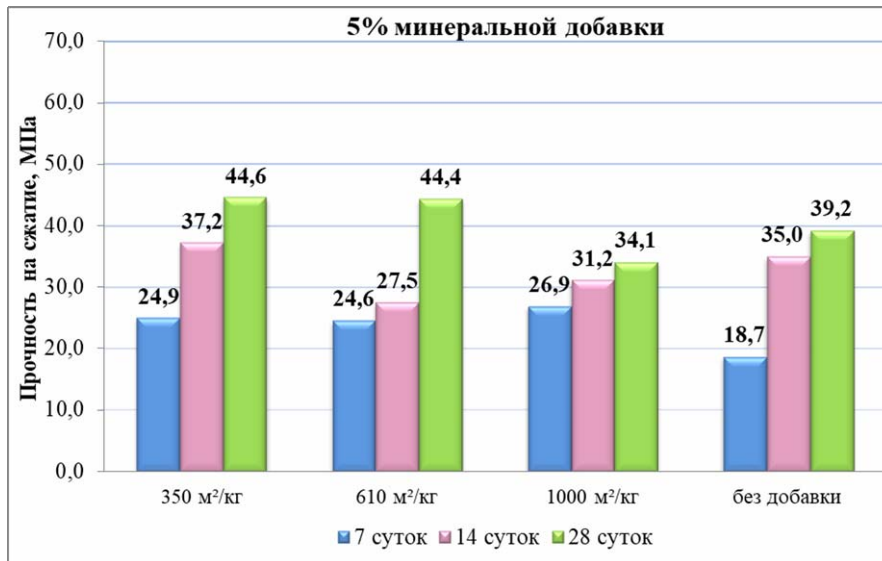
Составы бетонной смеси и плотность цементного камня

№ состава	Состав цементной смеси					Плотность цементного камня, кг/м³
	Минеральная добавка			Цемент, г	Вода, мл	
	БКК 350, %	БКК 50/50, %	БКК 1000, %			
1	25	-	-	225	105	1918
2	-	25	-	225	105	1968
3	-	-	25	225	105	1871
4	15	-	-	255	105	1816
5	-	15	-	255	105	2043
6	-	-	15	255	105	1908
7	5	-	-	285	105	1977
8	-	5	-	285	105	2021
9	-	-	5	285	105	1932
10	-	-	-	300	105	1957

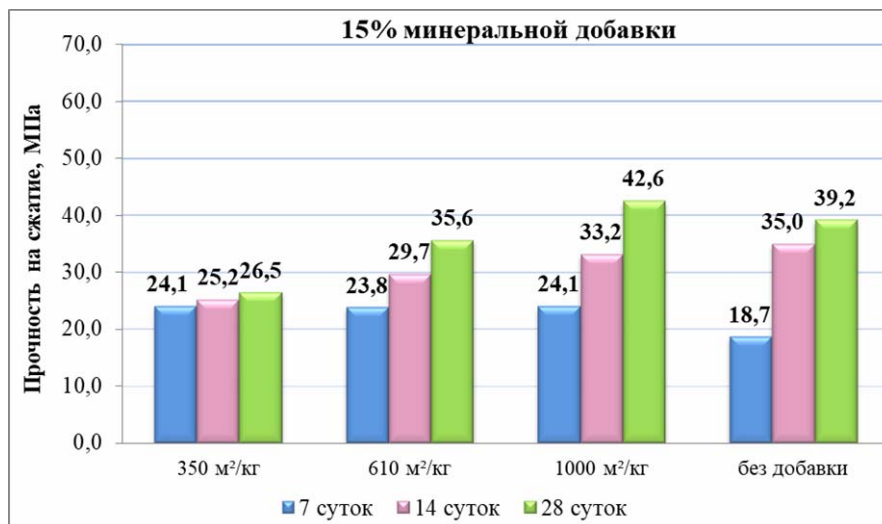
По приведенным выше составам были получены образцы  $3 \times 3 \times 3$  см и испытаны на прочность при сжатии на 7, 14 и 28-е сутки, результаты испытаний представлены на рис. 5.



а



б



в

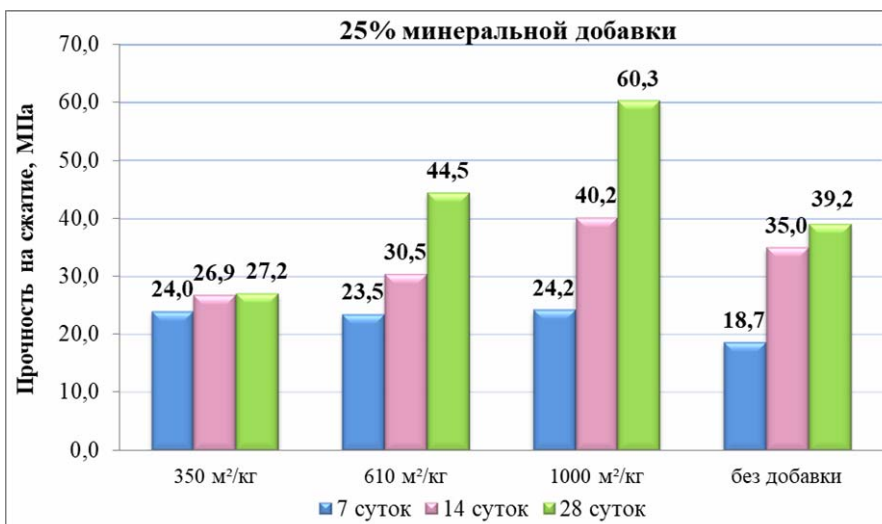


Рис. 5. Прочность цементного камня:  
а – при 5 % минеральной добавки; б – при 15 % минеральной добавки;  
в – при 25 % минеральной добавки



Анализируя полученные данные (рис. 5, а), видим, что при введении минеральной добавки разной удельной поверхности в дозировке 5 %, с заменой соответствующей части цемента, на 28-е сутки наихудшими показателями прочности обладает состав с  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ , однако два остальных состава имеют практически одинаковую прочность на сжатие, и она на 19 % выше, чем у контрольного состава.

Стоит отметить, что контрольные образцы без введения минеральной добавки имеют такую прочность из-за повышенного водоцементного отношения, обусловленного необходимостью обеспечения формуемости составов со всеми видами минеральных добавок, обладающих потенциально повышенной водопотребностью, кроме того, одинаковое В/В позволяет в наилучшей степени проследить влияние химического взаимодействия в изучаемой системе.

При дозировке минеральной добавки в количестве 15 и 25 % картина значительно меняется (рис. 5, б, в). Прочность при введении минеральной добавки с  $S_{уд}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$  меньше прочности контрольного состава без добавления минеральной добавки на 27-29 %. А минеральная добавка, полученная путем смешения, на 7-е и 14-е сутки при разных дозировках выдает практически одинаковые прочности, эта тенденция прослеживается и на 28-е сутки, однако при дозировке 15 % прочность меньше почти на 20 %.

Составы с минеральной добавкой с  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  имеют наибольшую прочность при ее дозировке 15 %, в данном случае прочность достигает значения 42,6 МПа, а при введении ее в количестве 25 % от массы цемента – 60,3 МПа, что больше прочности контрольного состава на 14-61 % соответственно. Вероятно, это вызвано наличием пуццолановой активности у минеральной добавки, полученной из продуктов рециклинга керамического кирпича с более высокой удельной поверхностью ( $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). Пуццолановой активностью в составе обожженных глиен в первую очередь обладает стекловидная фаза, образовавшаяся в процессе обжига глины и являющаяся самым твердым компонентом в системе, поэтому при помоле прежде всего измельчаются более мягкие частицы, состоящие преимущественно из слабообожженной глины, вероятно, при дисперсности до  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Степень измельчения стекловидной составляющей является низкой, что обуславливает пониженную пуццолановую активность такой добавки. При более тонком помоле после измельчения мягких частиц основные затраты энергии уходят на измельчение стекловидной фазы, поэтому при удельной поверхности  $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  наблюдается значительное увеличение пуццолановой активности.

**Выводы:** 1. Продукты рециклинга керамического кирпича обладают высокой размолоспособностью, за 2 минуты помола его удельная поверхность достигает  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а за 5 минут –  $550 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Дальнейший рост происходит менее интенсивно, но за 20 минут помола удельная поверхность достигает значения  $1088 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

2. Для повышения прочности цементного камня рекомендовано вводить минеральную добавку с удельными поверхностями  $350 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $610 \text{ м}^2/\text{кг}$  (смешанную) в количестве 5 %, что повысит прочность при уменьшении соответствующей части цемента на 19-20 %. А минеральная добавка с удельной поверхностью  $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  в более высоких дозировках позволяет повысить прочность на 14-61 %.

3. При увеличении дозировки минеральной добавки уменьшается доля цементной составляющей, что приводит к экономии цемента и снижает выбросы пыли при его производстве. Когда нет необходимости получения высоких прочностей, можно вводить более 25 %, но при этом использовать минеральную добавку на основе рециклинга керамического кирпича с удельными поверхностями  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $S_{уд}=610 \text{ м}^2/\text{кг}$  (смешанную).

#### Список литературы

1. Lesovik, V.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete / V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, M.Yu. Elistratkin, D.S. Podgorniy // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – P. 104–110.

2. Аласханов, А.Х. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья / А.Х. Аласханов, Х.Э. Таймасханов, М.С. Сайдумов, Т.С.А. Муртазаева // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. 18, № 1(27). – С. 63–70.
3. Lesovik, V.S. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, Z.K. Babaev, Z.B. Dzhumaniyazov // Glass and Ceramics. – 2023. – Vol. 80, No. 1–2. – P. 78–82.
4. Никуличев, Ю.В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналитический обзор / Ю.В. Никуличев ; РАН. ИНИОН. Центр научно-информационных исследований глобальных и региональных проблем. Отдел проблем европейской безопасности. – Москва, 2017. – 55 с.
5. Хасиев, А.А. Цементобетонные покрытия на основе отходов камнедробления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.А. Хасиев. – Грозный, 2013. – 24 с. – Защищена 18.05.2013.
6. Аласханов, А.Х. Рациональная утилизация вторичного заполнителя из керамического кирпичного боя в производстве легких бетонов / А.Х. Аласханов // Университетская наука. – 2021. – № 2(12). – С. 10–12. – EDN: GEVIAE.
7. Аласханов А.Х. Полифункциональные строительные композиты на основе техногенного сырья : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» / А.Х. Аласханов. – Грозный, 2023. – 478 с.
8. Кожушков, А.Д. Перспективы использования композиционных материалов в современном строительстве с учетом закона сродства структур / А.Д. Кожушков, Л.Х. Загороднюк, Л.А. Урханова [и др.] // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : материалы II Международного онлайн-конгресса. – Белгород, 2019. – С. 211–222. – EDN: HOCNHU.
9. Рыжих, В.Д. Проектирование составов ремонтных смесей с учетом закона сродства структур / В.Д. Рыжих, Л.Х. Загороднюк, Д.С. Махортов [и др.] // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : материалы II Международного онлайн-конгресса. – Белгород, 2019. – С. 246–250. – EDN: BSWSDf.
10. Лесовик, В.С. Керамический кирпич дорожного назначения для мощения тротуаров в регионах Приаралья / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, З.К. Бабаев, З.Б. Джуманиязов. – DOI: 10.14489/glc.2023.02.pp.053-060 // Стекло и керамика. – 2023. – Т. 96, № 2(1142). – С. 53–60. – EDN: XMXQAU.
11. Лесовик, В.С. Сродство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, И.Л. Чулкова, А.Д. Толстой, А.А. Володченко // Construction materials. – 2015. – № 9.
12. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении / В.С. Лесовик. – 2-е изд., допол. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – 287 с. – ISBN 978-5-361-00354-9.

## References

1. Lesovik, V.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additively Manufactured Concrete / V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, M.Yu. Elistratkin, D.S. Podgorniy // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – P. 104–110.
2. Lesovik, V.S. On the Issue of Measuring the Strength of Additionally Manufactured Concrete / V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, M.Yu. Elistratkin, D.S. Podgorniy // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – P. 104–110.
3. Lesovik, V.S. Ceramic Road-Brick for Side-Walk Pavement in the Regional Surrounds of the Aral Sea / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, Z.K. Babaev, Z.B. Dzhumaniyazov // Glass and Ceramics. – 2023. – Vol. 80, No. 1–2. – P. 78–82.
4. Nikulichev, Yu.V. Management waste. The experience of the European Union. Analytical review / Yu.V. Nikulichev ; RAN. INION. The Center for Scientific and

Information Research on Global and Regional Issues. Department of European Security Problems. – Moscow, 2017. – 55 p.

5. Khasiev, A.A. Cement-concrete coatings based on stone crushing waste : abstract of the dissertation of the Candidate of Sciences : 05.23.05 / A.A. Khasiev. – Grozny, 2013. – 24 p. – Protected on 18.05.2013.

6. Alaskhanov, A.H. Rational utilization of secondary aggregate from ceramic brick batter in the production of light concrete / A.H. Alaskhanov // University Science. – 2021. – No. 2(12). – P. 10–12. – EDN: GEVIAE.

7. Alaskhanov, A.H. Multifunctional building composites based on technogenic raw materials : dis. ... doct. of Sciences: 05.23.05. Dagestan State Technical University / A.H. Alaskhanov. – Grozny, 2023. – 478 p.

8. Kozhushkov, A.D. Prospects for the use of composite materials in modern construction, taking into account the law of structural affinity / A.D. Kozhushkov, L.H. Zagorodnyuk, L.A. Urkhanova [etc.] // Nature-like technologies of building composites for the protection of the human environment : II International Online Congress. – Belgorod, 2019. – P. 211–222. – EDN: HOCNHU.

9. Ryzhykh, V.D. Designing repair mixtures based on the law of structural affinity / V.D. Ryzhykh, L.Kh. Zagorodnyuk, D.S. Makhortov [etc.] // Nature-like technologies of building composites for the protection of the human environment : II International Online Congress. – Belgorod, 2019. – P. 246–250. – EDN: BSWSDF.

10. Lesovik, V.S. Ceramic road bricks for paving sidewalks in the Aral Sea region / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, Z.K. Babaev, Z.B. Jumaniyazov. – DOI: 10.14489/glc.2023.02.pp.053-060 // Glass and ceramics. – 2023. – Vol. 96, No. 2(1142). – P. 53–60. – EDN: XMXQAU.

11. Lesovik, V.S. Affinity of structures as a theoretical basis for designing composites of the future / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, I.L. Chulkova, A.D. Tolstoy, A.A. Volodchenko // Construction materials. – 2015. – No. 9.

12. Lesovik, V.S. Geonics (Geomimetics). Examples of Implementation in Construction Materials Science / V.S. Lesovik. – 2nd edition, supplemented. – Belgorod : Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2016. – 287 p. – ISBN 978-5-361-00354-9.

УДК 691 : 519.7

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_32

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8412) 48-74-77**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы», действительный  
член Нью-Йоркской академии наук**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*Институт химии твердого тела и  
механохимии Сибирского отделения РАН*  
Россия, 630128, Новосибирск, Кутателадзе, 18,  
тел.: (383) 332-40-02**Варенцов Валерий Константинович**,  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: vvk@ngs.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**Koshev Aleksander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the  
Department «Information and Computing  
Systems», Full member of the New York  
Academy of Sciences**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*Institute of Solid and Mechanochemistry of  
the Siberian Branch of RAS*  
Russia, 630128, Novosibirsk, 18, Kutateladze St.,  
tel.: (383) 332-40-02**Varentsov Valery Konstantinovich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: vvk@ngs.ruИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00135,  
<https://rscf.ru/project/25-21-00135/>.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕГРАФИТОВОГО ВОЛОКНИСТОГО ЭЛЕКТРОДА

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

Рассмотрена задача разработки метода моделирования распределения электрохимического процесса по толщине проточного трехмерного электрода (ПТЭ). Установлено, что разработанный метод позволит производить расчеты для определения свойств углеграфитовых материалов, которые при формировании объемно-пористого электрода обеспечат равномерное распределение металлического покрытия ПТЭ за счет правильного выбора распределенной по толщине электрода удельной реакционной поверхности. Отмечено, что поставленная задача может рассматриваться как задача оптимального управления электрохимической системой. Приведены результаты, показывающие, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой.

*Ключевые слова:* углеродные композитные материалы, проточные трехмерные электроды, электролиз, реакционная поверхность, математическое моделирование, задача оптимизации

## OPTIMIZATION OF CARBON FIBER METALLIZATION PROCESS AT DISTRIBUTED REACTION SURFACE OF CARBON GRAPHITE FIBER ELECTRODE

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

The problem of developing a method for modeling the distribution of the electrochemical process along the thickness of a flowing three-dimensional electrode (FTE) is considered. It is shown that the

developed method makes it possible to carry out calculations to determine the properties of carbon-graphite materials, which forming a volumetrically porous electrode, will provide the most uniform distribution of the metallic coating of the PTE due to the correct choice of the specific reaction surface distributed by the thickness of the electrode. It is shown that the problem can be regarded as a problem of optimal control of an electrochemical system. The results showing that the calculated and experimental data are in good agreement with each other are given.

*Keywords: carbon composite materials, flowing three-dimensional electrodes, electrolysis, reaction surface, mathematical modeling, optimization problem*

**Введение.** Используя ранее полученные нами результаты моделирования электрохимических процессов в проточных трехмерных электродах [1], запишем систему дифференциальных уравнений, устанавливающих связь между значениями электрохимических функций потенциала  $E(x)$ , плотностью поляризующего тока  $J(x)$  и концентрации осаждающегося металла  $C(x)$ . При этом рассматриваем осаждение одного металла и процесс осаждения будем считать квазистационарным, когда результирующее время осаждения можно распределить на периоды, в течение которых изменение технических характеристик процесса и электролизера можно считать не влияющим на общие результаты моделирования [2]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{-\kappa_l \frac{d\kappa_s}{dx}}{\kappa_s (\kappa_s + \kappa_l)} \frac{dE}{dx} + S_v(x) \left( \frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l} \right) J_s(x); \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{-S_v(x)}{vzF} J_s(x) \quad (2)$$

с граничными условиями:

$$C(0) = C_0, \quad \frac{\partial E}{\partial x}(0) = \frac{1}{\kappa_s} J, \quad \frac{\partial E}{\partial x}(L) = \frac{1}{\kappa_l} J, \quad (3)$$

где  $J$  – габаритная плотность тока, подаваемого на ПТЭ;  $\kappa_s$ ,  $\kappa_l$  – соответственно электропроводности материала электрода и электролита;  $L$  – толщина электрода.

Моделирующие уравнения (1)–(3) отличаются от ранее полученных нами и используемых при моделировании процессов в ПТЭ тем, что в уравнениях (1), (2) удельная реакционная поверхность считается зависимой от координаты по толщине электрода  $S_v = S_v(x)$ .

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) представляет собой двухточечную краевую задачу, решение которой мы осуществляли «методом стрельбы», когда по известному значению производной  $\frac{\partial E}{\partial x}(L) = \frac{1}{\kappa_l} J$  путем многократного решения

задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений подбирается недостающее начальное значение для функции  $E(x)$ , то есть  $E(0)$ . Для решения задачи Коши мы использовали модифицированный метод Рунге – Кутты [3].

Решение системы (1) – (3) позволяет расчетным путем находить распределение основных электрохимических функций  $E(x)$ ,  $J(x)$ ,  $C(x)$ , а следовательно, распределение металла по толщине ПТЭ и равномерность этого распределения.

**Постановка задачи оптимизации.** Задача, поставленная в настоящей работе, заключается в том, чтобы разработать метод моделирования и расчета для определения углеграфитовых материалов, которые при формировании объемно-пористого электрода обеспечат равномерное распределение металлического покрытия ПТЭ за счет правильного выбора распределенной по толщине ПТЭ удельной реакционной поверхности  $S_v(x)$ .

Таким образом, можно рассматривать задачу по оптимизации распределения электрохимического процесса по толщине ПТЭ как задачу оптимального управления

системой, описанной уравнениями (1)–(3) посредством правильного выбора управляющего воздействия  $u(x) = S_v(x)$ .

В более компактной форме, после соответствующих переобозначений, задача (1) – (3) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = f_1(y_1, y_2, y_3, u), \\ \frac{dy_2}{dx} = f_2(y_1, y_2, y_3, u), \\ \frac{dy_3}{dx} = f_3(y_1, y_2, y_3, u) \end{cases} \quad (4)$$

с граничными условиями

$$y_2(0) = \frac{1}{\kappa_s} J; \quad y_2(L) = \frac{1}{\kappa_l} J; \quad y_3(0) = C_0 \quad (5)$$

и критерием равномерности в интегральной форме

$$\sigma(u) = \int_0^L \left( \frac{J}{L} - J_s(y_1, y_3) \right)^2 dx \rightarrow \min. \quad (6)$$

Задача (4)–(6) представляет собой классическую задачу теории оптимального математического управления, для решения которой наиболее удобным является принцип максимума С.Л. Понтрягина [4], для реализации которого систему (4)–(6) необходимо дополнить уравнением, соответствующим критерию оптимизации управления (6):

$$\frac{dy_0}{dx} = \left( \frac{J}{L} - J_s(y_1, y_3) \right)^2 = f_0(y_1, y_3, u); \quad y_0(0) = 0. \quad (7)$$

Затем записывается сопряженная система дифференциальных уравнений относительно формально вводимых в рассмотрение функций  $\psi_i(x)$ ,  $i = 0, 1, 2$  с начальными условиями:

$$\frac{d\psi_i}{dx} = - \sum_{j=0}^2 \psi_j \frac{\partial f_j}{\partial y_i}, \quad i = 0, \dots, 2; \quad \psi_0(0) = 1; \quad \psi_1(L) = \psi_2(L) = 0. \quad (8)$$

Далее необходимо сформировать функцию Гамильтона по формуле

$$H(x, y_0(x), \dots, y_{n+3}(x), \psi_0(x), \dots, \psi_{n+3}(x), u(x)) = \sum_{i=0}^{n+3} \psi_i(x, y_i, u) f_i(x, \psi_i, u), \quad (9)$$

минимизация которой по управляющему воздействию

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m); \quad u_i = u(x_i); \quad x_0 = 0; \quad x_m = L; \quad i = 1, \dots, m \quad (10)$$

приводит к стационарной точке функции Гамильтона, в подавляющем большинстве случаев являющейся решением задачи оптимального управления.

В настоящей работе мы рассмотрим случай, когда изменением электропроводности УВМ по толщине ПТЭ в процессе электролиза можно пренебречь,  $dk_s/dx \approx 0$ , и первым слагаемым в уравнении (1) и последующих можно пренебречь, а за критерий равномерности распределения процесса в ПТЭ принята равномерность распределения потенциала электрода.

Предположим, что найдено такое управление  $u(x)$ , при котором распределение плотности тока в ПТЭ близко к равномерному:  $J_s(x) = J_m$ . Это влечет за собой

предположение о близком к равномерному распределении концентрации электроактивного вещества по толщине электрода, и задача (4)–(6) существенно упрощается и может быть записана в развернутой форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_0}{dx} = |E(x) - E_m|; \\ \frac{dy_1}{dx} = y_2; \\ \frac{dy_2}{dx} = u(x) \left( \frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l} \right) J_m; \\ \psi_0(x) = 1; \\ \frac{d\psi_1}{dx} = \text{sign}(E - E_m); \\ \frac{d\psi_2}{dx} = -\psi_1; \\ y_0(0) = 0; \quad y_2(0) = \frac{1}{\kappa_s} J; \quad y_2(L) = \frac{1}{\kappa_l} J; \\ \psi_0(0) = 1; \quad \psi_1(L) = \psi_2(L) = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

В этом случае функция Гамильтона имеет вид:

$$H = |E_m - E(x)| + \psi_1 y_2 + \psi_2 u(x) \left( \frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l} \right) J_m. \quad (12)$$

Решив систему уравнений (11), получим:

$$\psi_1(x) = (x - L) \text{sign}(E - E_m); \quad (13)$$

$$\psi_2(x) = \frac{1}{2} (x - L)^2 \text{sign}(E - E_m) \quad (14)$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} H = & -|E(x) - E_m| + (x - L) \text{sign}(E - E_m) y_2 + \\ & + \frac{1}{2} (x - L)^2 \text{sign}(E - E_m) u \left( \frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l} \right) J_m. \end{aligned} \quad (15)$$

Из последнего уравнения следует, что функция  $H = H(u)$  будет иметь минимум, когда третье слагаемое в выражении (15) будет минимальным. Из теории электрохимических процессов в ПТЭ известно [1, 2], что распределение потенциала  $E(x)$  по толщине ПТЭ имеет характерную  $U$ -образную форму, что позволяет сделать следующие выводы: в случае, когда  $E > E_m$ , значение  $u(x) = S_v(x)$  должно быть минимально возможным, а при  $E < E_m$  – максимальным. То есть при формировании катода из УВМ для объемно-пористого электрода необходимо, чтобы начальные слои УВМ имели меньшую удельную реакционную поверхность, в средней части электрода – большую и затем снова меньшую.

**Результаты решения задачи.** В качестве иллюстрации влияния распределения  $S_v(x)$  по толщине ПТЭ и возможности оптимизации процесса металлизации по этому параметру приведем результаты расчетного и экспериментального распределения металлического осадка меди по толщине ПТЭ, при этом в качестве материала катода использовались УВМ марки АМН и ВНГ-50, реакционная поверхность которых

180  $\text{см}^{-1}$  и 265  $\text{см}^{-1}$  соответственно (рис. 1). При этом использовался сернокислый электролит состава (г/л):  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 170,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 25,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 80; удельная электрическая проводимость электролита 0,101  $\text{См/см}$ ; концентрация ионов меди в растворе в заданном узком интервале ( $0,16 \pm 0,03$ ) г/л; габаритная плотность тока 500  $\text{А/м}^2$ . Электроосаждение меди проводилось на электроды толщиной 6 мм.

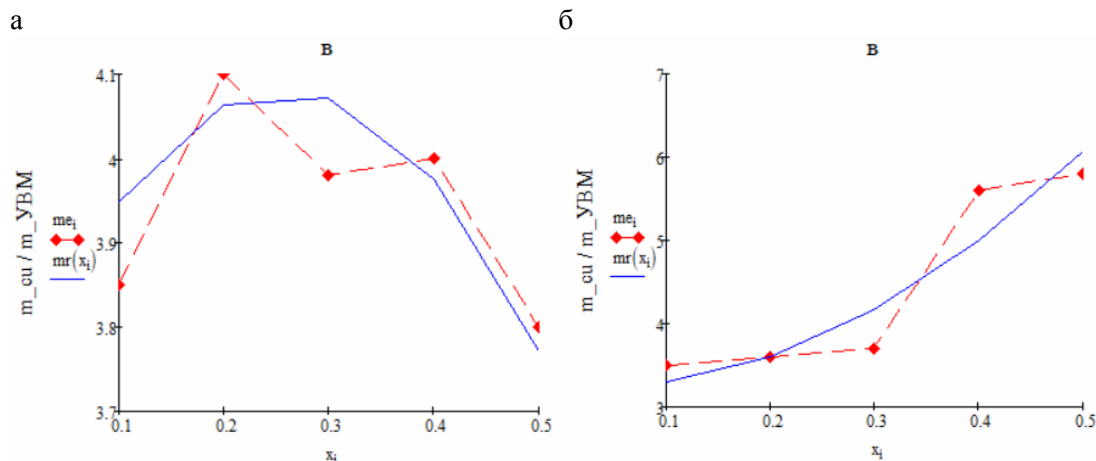


Рис. 1. Расчетное (сплошная линия) и экспериментальное (точки) распределение металла по толщине электрода из УВМ АМН (а) и ВНГ-50 (б) для исходной скорости потока 0,4  $\text{см/с}$  и времени электролиза 180 мин

Приведенные результаты показывают, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой; при металлизации углеродистого катода на УВМ марки ВНГ-50 общее количество осажденного металла больше общего количества металла, осажденного в тех же условиях на катод из УВМ марки АМН. Это, по-видимому, объясняется большей удельной электропроводностью материала марки ВНГ-50 в сравнении с электропроводностью УВМ марки АМН, однако распределение меди по толщине катода из УВМ марки АМН более равномерное, чем распределение меди по толщине катода из УВМ марки ВНГ-50.

Исходя из теоретических выводов, приведенных ранее, можно предположить, что для улучшения равномерности распределения медного покрытия ПТЭ можно было бы использовать объемно-пористый катод, составленный из трех слоев УВМ в следующей последовательности: первый слой С из УВМ марки АМН, второй слой – из УВМ марки ВНГ-50 и третий слой – опять из УВМ марки АМН.

На рис. 2 приведены результаты расчетов распределения меди по толщине ПТЭ, состоящего из трех слоев УВМ, размещенных в порядке, означенном в предыдущем абзаце.

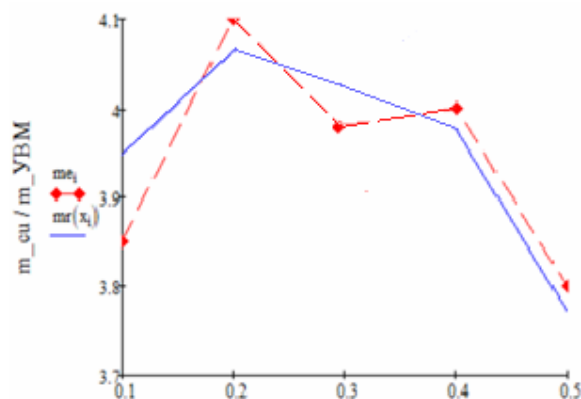


Рис. 2. Расчетное и экспериментальное распределение меди по толщине ПТЭ, состоящего из трех слоев УВМ:

1 – АМН, 2 – ВНГ-50, 3 – АМН,  $v = 0,4 \text{ см/с}$ ,  $t = 180 \text{ мин}$



В таблице приведены данные показателей равномерности распределения меди по толщине ПТЭ для рассмотренных условий, max/min: max – наибольшая толщина осадка, min – минимальная толщина осадка.

Значение показателя равномерности распределения меди по толщине ПТЭ

1-й слой УВМ	2-й слой УВМ	1-й слой УВМ	Скорость потока $v$ , см/с	Время электролиза $t$ , с	max/min
АМН	АМН	АМН	0,4	180	1,20
ВНГ-50	ВНГ-50	ВНГ-50	0,4	180	1,88
АМН	ВНГ-50	АМН	0,4	180	1,07

**Выводы.** Показано, что наилучшего распределения меди по толщине проточного объемно-пористого катода можно добиться при использовании катода, состоящего из трех слоев УВМ марок АМН, ВНГ-50, АМН последовательно.

#### Список литературы

1. Варенцов, В.К. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент : моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза : ПГУАС, 2020. – 172 с.
2. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза : ПГУАС, 2015. – 288 с. – ISBN 978-5-9282-1319-0.
3. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 630 с. – ISBN 5-93208-043-4.
4. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – Москва : Наука, 1969. – 392 с.
5. Варенцов, В.К. Реакционная поверхность как одна из важнейших характеристик композитов и нанокompозитов на основе металлизации углеграфитовых волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.В. Кузина, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 2 (63). – С. 92–98.
6. Кузина, В.В. Изменение удельной реакционной поверхности углеграфитового волокнистого электрода при гальванической металлизации / В.В. Кузина, А.Д. Рыжов, В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 3 (64). – С. 73–77.

#### References

1. Varentsov, V.K. Redox processes on flowing three-dimensional electrodes. Mathematical modeling. Theory. Experiment : monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova, V.V. Kuzina. – Penza : PGUAS, 2020. – 172 с.
2. Varentsov, V.K. Modern problems of electrolysis and problems of process optimization in reactors with three-dimensional carbon electrodes : monogr. / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova. – Penza : PGUAS, 2015. – 288 с. – ISBN 978-5-9282-1319-0.
3. Bakhvalov, N.S. Numerical methods / N.S. Bakhvalov, N.P. Zhidkov, G.M. Kobelkov. – Moscow : Laboratory of Basic Knowledge, 2001. – 630 с. – ISBN 5-93208-043-4.
4. Pontryagin, L.S. Mathematical theory of optimal processes / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko. – Moscow : Nauka, 1969. – 392 с.
5. Varentsov, V.K. Reaction surface as one of the most important characteristics of composites and nanocomposites based on metallization of carbon-graphite fiber materials / V.K. Varentsov, V.V. Kuzina, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2025. – № 2 (63). – P. 92–98.
6. Kuzina, V.V. The change of specific reaction surface of carbon graphite fiber electrode at galvanic metallization / V.V. Kuzina, A.D. Ryzhov, V.K. Varentsov, A.N. Koshev // Regional architecture and engineering. – 2025. – № 3 (64). – P. 73–77.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_38

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

**Куимова Елена Ивановна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: lена-kui@mail.ru

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

**Рыжов Антон Дмитриевич,**  
старший преподаватель кафедры  
«Информационно-вычислительные  
системы»  
E-mail: penza48@rambler.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

**Kuimova Elena Ivanovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: lена-kui@mail.ru

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

**Ryzhov Anton Dmitrievich,**  
Senior Lecturer of the Department  
«Information and computing systems»  
E-mail: penza48@rambler.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООЧИЩЕНИЯ ИЗВЕСТКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.И. Куимова, В.И. Логанина, А.Д. Рыжов

Приведены сведения о моделировании процесса самоочищения известковых покрытий. Рассмотрены технология получения и применение фотокатализатора оксида цинка, иммобилизованного на синтетическом цеолите, в известковых составах, предназначенных для отделки наружных стен зданий и реставрации зданий исторической застройки. Для описания кинетики самоочищения предложена математическая модель, показывающая изменение уровня накопления загрязнений в зависимости от времени самоочищения.

*Ключевые слова: самоочищение, фотокатализ, известковое покрытие, моделирование, оксид цинка*

## MODELING THE PROCESS OF SELF-CLEANING OF LIME COATINGS

E.I. Kuimova, V.I. Loganina, A.D. Ryzhov

The article presents information on modeling the process of self-cleaning of the surface of lime coatings. The technology for obtaining and the use of a zinc oxide photocatalyst immobilized on a synthetic zeolite in lime compositions intended for finishing the external walls of buildings and restoring historical buildings are considered. To describe the kinetics of self-cleaning, a mathematical model is proposed that describes the change in the level of accumulation of contaminants depending on the time of self-cleaning.

*Keywords: self-cleaning, photocatalysis, lime coating, modeling, zinc oxide*

Одной из важнейших задач современного материаловедения является получение функциональных материалов с заданными свойствами [1]. В последние годы значительное внимание уделяется созданию и применению самоочищающихся покрытий [2-5]. Штукатурные покрытия, обладающие способностью к самоочищению, обеспечивают не только декоративную и защитную функции, но и экономическую эффективность, обусловленную существенным сокращением затрат на обслуживание и поддержание чистоты фасадов.

Самоочищение поверхности достигается за счет двух основных механизмов. Первый – это создание гидрофобной поверхности, которая отталкивает воду и препятствует закреплению загрязнений [6], второй – это использование фотокатализа [7]. Покрывают, содержащие оксиды металлов, таких, как  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , под воздействием света генерируют активные радикалы, которые разрушают органические загрязнители.

В последние годы оксид цинка зарекомендовал себя как перспективный материал ввиду его физических и химических свойств, таких, как высокая химическая и механическая стабильность, широкий диапазон поглощения излучения, высокая каталитическая активность, нетоксичность и т.д. Нами предложена технология получения фотокатализатора на основе оксида цинка, иммобилизованного на синтетическом цеолите [8, 9]. Для повышения удельной поверхности оксида цинка проводили его измельчение в планетарной мельнице.

Для иммобилизации фотокатализатора на поверхности носителя оксид цинка и алюмосиликатная добавка смешивались двумя способами:

- механическое смешивание синтезированной алюмосиликатной добавки и порошка оксида цинка;

- добавление порошка оксида цинка в процессе синтеза добавки в соотношении частей 1:8:14:2 (алюминиевая пудра: жидкое стекло: вода в соотношении).

Удельная площадь поверхности образца синтезированной алюмосиликатной добавки определялась методом БЭТ и составила  $101,28 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Найдено оптимальное значение удельной поверхности оксида цинка, составляющее  $6,2\text{--}8,5 \text{ м}^2/\text{г}$ . Установлено, что оптическая ширина запрещенной зоны оксида цинка составляет 2,96 эВ и 2,70 эВ, что существенно меньше типичного значения 3,37 эВ, характерного для объемного материала. Данное обстоятельство, по всей видимости, может быть связано с легированием высокодефектного ультрадисперсного порошка  $\text{ZnO}$  ионами алюминия или кремния в процессе синтеза или смешения с алюмосиликатной добавкой, что коррелирует с данными инфракрасной спектроскопии [10, 11].

Исследовалась способность к самоочищению известковых покрытий с добавкой фотокатализатора оксида цинка, иммобилизованного на синтетическом цеолите. Оценка эффективности самоочищающей способности образцов проводилась в соответствии с отечественным стандартом ГОСТ Р 57255-2016. Для оценки фотокаталитической активности были изготовлены образцы известкового покрытия. Процедура измерения проводилась в соответствии с ГОСТ Р 57255-2016. Для удаления органических загрязнений образец предварительно облучали ультрафиолетовым светом в течение 24 часов. Использовали ультрафиолетовую лампу с длиной волны 350 нм и производительностью  $85 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рис. 1). Затем на поверхность наносили олеиновую кислоту, которая служила загрязнителем. Были проведены измерения угла смачивания для пяти образцов в пяти различных точках в процессе УФ-облучения. Результаты измерений приведены на рис.2.

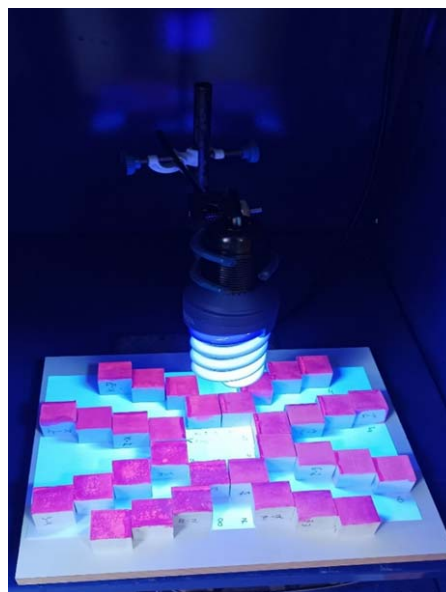


Рис. 1. Установка УФ-облучения

Результаты исследований показывают, что начальный угол смачивания составляет:  $75^\circ$  – для покрытия на основе композиции без фотокатализатора,  $72^\circ$  – для покрытия поверхности с фотокатализатором. Для покрытий на основе известковой композиции без введения фотокатализатора угол смачивания стабилен и не изменяется в результате ультрафиолетового облучения. В покрытии на основе состава с фотокатализатором по мере увеличения времени УФ-облучения угол смачивания постепенно

уменьшается до  $26^\circ$  через 5 часов и до  $18^\circ$  через 10 часов. Это указывает на то, что гидрофобный слой олеиновой кислоты исчезает с поверхности в течение этого периода. Уменьшение первоначального угла смачивания после УФ-облучения поверхности подтверждает фотокаталитические свойства поверхности.



Рис. 2. Изменение значения краевого угла смачивания от времени УФ-облучения образца покрытия на основе разрабатываемого состава:

1 – известковое покрытие (контрольный состав, без фотокатализатора); 2 – известковое покрытие с применением оксида цинка, иммобилизованного на синтетическом цеолите

Опишем кинетику изменения уровня накопления повреждения (загрязнения) покрытия при самоочищении дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dW}{dt} = kW, \quad (1)$$

где  $k$  – константа скорости изменения.

Уровень накопления повреждений будем определять как

$$W = \frac{H}{H_{кр}}, \quad (2)$$

где  $H$  – текущее значение состояния покрытия в процессе самоочищения, оцененное по показателям угла смачивания;  $H_{кр}$  – оценка состояния покрытия в начальный момент.

Результаты расчета изменения уровня накопления повреждений (загрязнений) в процессе УФ-облучения приведены в таблице.

Изменение уровня накопления повреждений (загрязнений)  
в процессе УФ-облучения известкового покрытия

Время УФ-облучения	Уровень накопления повреждений (загрязнений)
0	1,0
2	0,583
4	0,472
6	0,375
8	0,305
10	0,25
12	0,25

Очевидно, что  $W(0)=1$  и общим решением дифференциального уравнения является функция

$$W = e^{-kt}, \quad (3)$$

где  $t$  – время самоочищения, ч;  $k$  – константа скорости самоочищения, ч<sup>-1</sup>.

Полученные результаты моделирования сравнивали с экспериментальными данными для подтверждения точности и надежности модели (рис. 3).

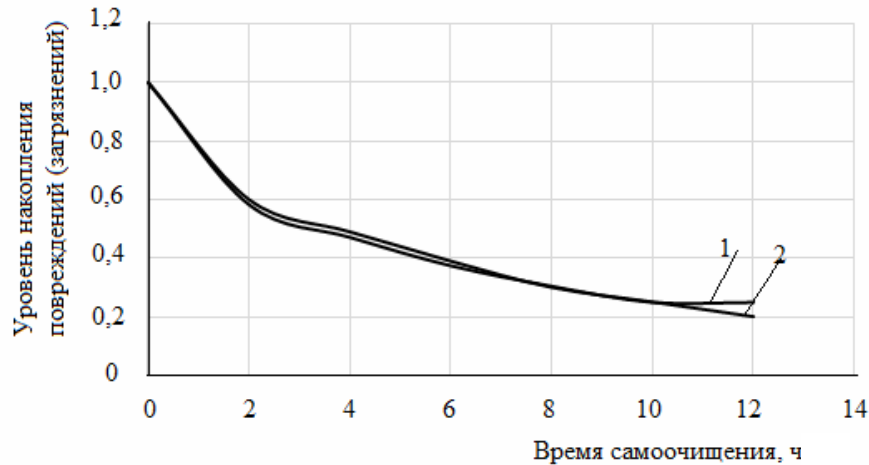


Рис. 3. Кинетика самоочищения известковых покрытий:

1 – экспериментально полученные данные;

2 – расчетные данные в соответствии с формулой (4)

Анализ полученных результатов свидетельствует, что расчетные данные совпадают с экспериментальными. После проведения параметризации константы  $k$  и верификации результатов расчета получена регрессионная модель

$$W = e^{-0,137t} \quad (4)$$

с детерминацией 86 %.

При этом нельзя утверждать, что на разных этапах активной стадии накопления повреждений интенсивность самоочищения поверхности покрытия одинакова. В зависимости от вида покрытия и некоторых других причин первая половина активной стадии характеризуется особенно резким увеличением скорости самоочищения, в дальнейшем процессы протекают более плавно. Таким образом, кинетика самоочищения поверхности покрытий с математической точки зрения должна описываться дифференциальными уравнениями порядка выше первого. Это означает, что при анализе процесса необходимо учитывать не только скорость изменения контролируемого параметра, но и, как минимум, ускорение. Поэтому предлагается в качестве модели процесса самоочищения использовать функцию

$$Y(t) = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} + C_3 e^{\alpha_3 t}, \quad (5)$$

являющуюся решением дифференциального уравнения третьего порядка.

Коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  характеризуют изменение (скорость, ускорение) контролируемого параметра на разных этапах старения покрытия.

Найдем  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по экспериментальной характеристике уровня повреждений. Составляющая  $C_1 e^{\alpha_1 t}$  определяет процесс при  $0 \leq t \leq 2$ . Значение  $\alpha_2$  можно вычислить по концу экспериментально полученного процесса, а именно:

$$W(0+T) = A e^{\alpha_1(0+T)} \text{ при } t < 2,$$

$$W(t+T) = Be^{\alpha_2(t+T)} \text{ при } t > 2,$$

$$\alpha_1 = \frac{\ln(W(T)/W(0))}{T},$$

$$\alpha_2 = \frac{\ln(W(t+T)/W(t))}{T}.$$

Из экспериментальных данных следует:  $W(0) = 1$ ,  $W(2) = 0,583$ ,  $y(> 2) = 0,25$ .

В данном случае  $\alpha_1 = -0,27$ ,  $\alpha_2 = -0,08$ . Решаем задачу Коши для идентификации констант процесса:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 1, \\ C_1 e^{2\alpha_1} + C_2 e^{2\alpha_2} = 0,583. \end{cases}$$

В результате зависимость представится в виде

$$Y(t) = 0,56e^{-0,27t} + 0,44e^{-0,08t} \quad (6)$$

с детерминацией 95 %.

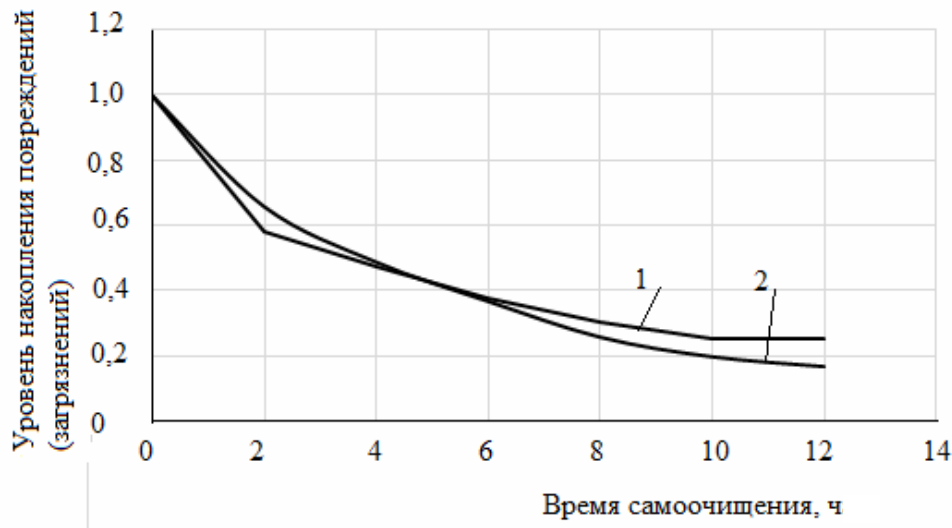


Рис. 4. Кинетика самоочищения известковых покрытий:

- 1 – экспериментально полученные данные;  
2 – расчетные данные в соответствии с формулой (6)

Результаты расчетов (рис. 4) свидетельствуют, что модель (6) более адекватно описывает кинетику самоочищения известковых покрытий.

#### Список литературы

1. Фаликман, В.Р. Новые высокоэффективные нанодобавки для фотокаталитических бетонов: синтез и исследование / В.Р. Фаликман, А.Я. Вайнер // Нанотехнологии в строительстве. – 2015. – Т. 7, No 1. – С. 18–28.
2. Лукутцова, Н.П. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нано-дисперсного диоксида титана / Н.П. Лукутцова, О.А. Постникова, Г.Н. Соболева, Д.В. Ротарь, Е.В. Оглоблина // Строительные материалы. – 2015. – No 11. – С. 5–8.
3. Tolstoy, A.D. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, I.O. Vodopyanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560 (1). Article No 012156.

4. Chen, J. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications / J. Chen, C. Poon // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1899–1906.
5. Zhang, J. Fabrication and characterization of Eu<sup>2+</sup>-doped lanthanum-magnesium-gallium / TiO<sub>2</sub>-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation / J. Zhang, Z. Liu // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45 (8). – P. 10342–10347.
6. Логанина, В.И. Оценка супергидрофобных свойств покрытий на основе акриловой смолы / В.И. Логанина, К.А. Сергеева // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – №1. – С.86–89.
7. Губарева, Е.Н. Сравнительная оценка активности кремнеземного сырья и фотокаталитического композиционного материала на его основе / Е.Н. Губарева, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, М.В. Лабузова // *Обогащение руд*. – 2019. – No 6. – С. 25–30.
8. Loganina, V.I. Amorphous Aluminosilicates as a Structure-Forming Additive in Cementitious Systems / V.I. Loganina, K. Zhegera, R. Fediuk, R. Timokhin, N. Zayakhanov, Y. Liseitsev // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2020. – 32(5). – 06020004.
9. Loganina, V.I. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 409–413.
10. Логанина, В.И. Исследование механизма фотокаталитической активности оксида цинка в присутствии синтетического цеолита / В.И. Логанина, А.Д. Рыжов, И.А. Пронин, А.А. Карманов, Н.Д. Якушова. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11 // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, вып. 11. – С. 6–17.
11. Логанина, В.И. Фотокаталитические свойства известковых покрытий с добавкой на основе синтетических алюмосиликатов / В.И. Логанина, А.Д. Рыжов. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_2\_66 // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 2 (59). – С. 66–72.
12. Бондарь, В.С. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагрузках / В.С. Бондарь, В.В. Даншин, Д.А. Макаров // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2024. – №2. – С.125–152.

## References

1. Falikman, V.R. New highly effective nano-additives for photocatalytic concrete: synthesis and study / V.R. Falikman, A.Ya. Vainer // *Nanotechnology in construction*. – 2015. – Vol. 7, No. 1. – P. 18–28.
2. Lukutsova, N.P. Photocatalytic coating based on the additive of nano-dispersed titanium dioxide / N.P. Lukutsova, O.A. Postnikova, G.N. Soboleva, D.V. Rotar, E.V. Ogloblina // *Construction materials*. – 2015. – No. 11. – P. 5–8.
3. Tolstoy, A.D. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev, I.O. Vodopyanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560 (1). Article No 012156.
4. Chen, J. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications / J. Chen, C. Poon // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – P. 1899–1906.
5. Zhang, J. Fabrication and characterization of Eu<sup>2+</sup>-doped lanthanum-magnesium-gallium / TiO<sub>2</sub>-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation / J. Zhang, Z. Liu // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45 (8). – P. 10342–10347.
6. Loganina, V.I. Evaluation of superhydrophobic properties of coatings based on acrylic resin / V.I. Loganina, K.A. Sergeeva // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – No. 1. – P. 86–89.

7. Gubareva, E.N. Comparative assessment of the activity of silica raw materials and photocatalytic composite material based on it / E.N. Gubareva, Yu.N. Ogurtsova, V.V. Strokova, M.V. Labuzova // Ore dressing. – 2019. – No. 6. – P. 25–30.
8. Loganina, V.I. Amorphous Aluminosilicates as a Structure-Forming Additive in Cementitious Systems / V.I. Loganina, K. Zhegera, R. Fediuk, R. Timokhin, N. Zayakhanov, Y. Liseitsev // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2020. – 32(5). – 06020004.
9. Loganina, V.I. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 409–413.
10. Loganina, V.I. Study of the mechanism of photocatalytic activity of zinc oxide in the presence of synthetic zeolite / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov, I.A. Pronin, A.A. Karmanov, N.D. Yakushova. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11 // Bulletin of MGSU. – 2024. – Vol. 19, Issue. 11. – P. 6–17.
11. Loganina, V.I. Photocatalytic properties of lime coatings with an additive based on synthetic aluminosilicates / V.I. Loganina, A.D. Ryzhov. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_2\_66 // Regional architecture and engineering. – 2024. – No. 2 (59). – P. 66–72.
12. Bondar, V.S. Mathematical modeling of deformation processes and damage accumulation under cyclic loading / V.S. Bondar, V.V. Danshin, D.A. Makarov // Bulletin of PNIPU. Mechanics. – 2024. – №2. – P.125–152.



УДК 624.016

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_45

*Петрозаводский государственный университет**Petrozavodsk State University*Россия, 185910, г. Петрозаводск,  
пр. Ленина, д. 33Russia, 185910, Petrozavodsk,  
33, Lenin Avenue**Колесников Геннадий Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технология и организация  
строительства»  
E-mail: kg@petrsu.ru**Kolesnikov Gennady Nikolaevich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department of «Technologies and  
Construction Management»  
E-mail: kg@petrsu.ru

## САМАННЫЕ БЛОКИ ИСТОРИЧЕСКИХ ПОСТРОЕК: АППРОКСИМАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ

Г.Н. Колесников

Рассмотрены исторические и региональные аспекты применения блоков из глинистых грунтов в народном домостроении в XIX–начале XX века. Предложена модель для анализа поведения при сжатии и определения модуля упругости материала блоков с использованием аппроксимации экспериментальных данных методом случайного поиска.

*Ключевые слова: саман, рациональное природопользование, квазихрупкие материалы, модуль упругости, моделирование*

## ADOBE BLOCKS OF HISTORICAL BUILDINGS: APPROXIMATION OF SAMPLES TEST RESULTS

G.N. Kolesnikov

The article examines historical and regional aspects of the use of clay soil blocks in traditional housing construction in the 19th and early 20th centuries. The article proposes a model for analyzing the behavior at compression and determining the elastic modulus of adobe samples using the approximation of experimental data by the random search method.

*Keywords: adobe, rational use of natural resources, quasi-brittle materials, modulus of elasticity, modeling*

**Введение.** Термин «саман» означает «высушенный на солнце кирпич», т.е. подчеркивает ключевую особенность материалов данного класса – рациональное использование солнечной энергии в южных регионах ряда стран [1, 2, 3]. Сырьем для изготовления самана является увлажненная смесь местного глинистого грунта и соломы [1, 2] или иных материалов растительного происхождения [3]. Первоначально основным методом производства самана было ручное формование, но позже его заменило формование самана в деревянных прямоугольных формах. Этот метод сохранился до наших дней, т.к. обеспечивает одинаковые размеры самана, что способствует более быстрому и качественному строительству [1].

Много веков саманные конструкции имели ряд преимуществ, таких, как рациональное использование солнечной энергии, упрощение логистики за счет использования местных ресурсов и низкое воздействие на окружающую среду, однако в XX веке они уступают по критериям качества конструкциям из таких материалов, как подходящие разновидности бетона и материалы на основе древесины [4].

Сохранившиеся до наших дней саманные постройки концентрируют в себе многовековой опыт народной архитектуры. Одним из самых известных примеров саманной архитектуры является город Шибам в Йемене [5]. Исследование физико-механических

характеристик и поведения саманных кирпичей имеет основополагающее значение для обоснования инициатив по сохранению исторических конструкций в целях социально-экономического развития регионов. К этому научному направлению относится ряд новых публикаций. Исследование [6] включает в себя систематический анализ семи видов самана, выполненный с использованием современных методов испытаний строительных материалов. Систематический аналитический обзор научных статей [4], опубликованных в период с 2016-го по 2021 год, в основном в странах Европы и Южной Америки, показал, что в современных условиях саманное строительство может быть приемлемым в регионах с ограниченными ресурсами. В то же время сохранившиеся саманные конструкции представляют интерес с точки зрения истории науки и техники.

Исторические сооружения и их разрушение под воздействием собственного веса, циклических колебаний влажности и температуры, а также сейсмических воздействий можно рассматривать как долгосрочный эксперимент. Комплексный анализ таких сооружений может улучшить понимание поведения сооружений и дать представление о направлениях совершенствования современных строительных материалов, конструкций и технологий. Например, инженерный анализ рис. 1, на котором показаны части исторических саманных зданий, типичных для второй половины XIX и начала XX века в южных регионах России, показывает, что армирование горизонтальных швов полимерной или металлической сеткой могло бы повысить устойчивость сооружения и компенсировать недостатки перевязки саманных блоков. Однако в то время у строителей не было таких возможностей; в настоящее время, например, армирование горизонтальных швов применяется в технологиях строительства из газобетона [7, 8, 9].



Рис. 1. Фрагменты одноэтажных исторических саманных построек (примерно 1900 г.) перед сносом в 2022 г. Автор фото Ю.Н. Колесников.

Локализация построек отмечена зеленой точкой на фрагменте карты (адаптировано из maps.yandex.ru)

Можно также предположить (см. рис. 1, слева), что защита стен и фундамента от воздействия влаги недостаточна, это снижает жесткость и прочность саманной конструкции и увеличивает ее деформацию. Тем не менее саманная конструкция выполнила свою функцию, а медленные процессы ее неизбежного разрушения и трансформации ценности здания для общества были синхронны, т.е. продолжительности физического и морального устаревания совпали. При этом снос и утилизация саманной конструкции не приводит к существенному нарушению экологического баланса. Наряду с упомянутыми выше, статьи [10, 11, 12] содержат детальные описания примеров сохранившихся саманных конструкций. Анализ литературы показал, что исследования физико-механических характеристик самана как материала являются ключевыми в анализе поведения данного материала под нагрузкой. Поведение

материала в конструкции с точки зрения механики отражают графики напряжение – деформация при испытаниях на сжатие и изгиб. Типичный график, полученный при испытаниях самана на одноосное сжатие, имеет восходящую ветвь, точку пика и нисходящую ветвь [1]. Саман демонстрирует квазихрупкое поведение, аналогичное поведению материалов, подобных бетону. По этой причине для аппроксимации экспериментальных данных удобно использовать модель напряжение– деформация, которая содержит параметры для калибровки модели, зависящие от материала [13].

Целью исследований является разработка алгоритма для аппроксимации известных по литературе результатов испытаний образцов самана на одноосное сжатие и определение модуля упругости. В этом случае достаточно использовать только восходящую ветвь упомянутой выше кривой напряжение – деформация.

**Материалы и методы.** В данной работе для аппроксимации результатов испытаний образцов самана на одноосное сжатие в предпиковом и пиковом состояниях используется модель с двумя параметрами [13]:

$$\sigma = \sigma_{peak} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{peak}} e^{\frac{1}{n} \left( 1 - \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon_{peak}^n} \right)} \right)^B. \quad (1)$$

Здесь  $n$  и  $B$  – безразмерные параметры, которые необходимо откалибровать с использованием экспериментальных данных. Метод наименьших квадратов позволяет вычислить эти параметры, однако в некоторых случаях появляются затруднения [12]. Как альтернатива, метод случайного поиска преодолевает эти барьеры, однако не удалось найти его применения при решении задач рассматриваемого класса. В текущей работе аппроксимация известных по литературе результатов испытаний в целях определения модуля упругости базируется на использовании метода Монте-Карло и геометрических характеристик кривой напряжение – деформация. В точке перегиба этой кривой модуль упругости достигает наибольшего значения. Абсциссу точки перегиба левой (предпиковой) ветви определяет уравнение (2).

$$\varepsilon^{(left)} = \varepsilon_{peak} \left( 1 + \frac{n-1 - \sqrt{4Bn + (n-1)^2}}{2B} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (2)$$

Принимая  $\varepsilon = \varepsilon^{(left)}$ , вычислим модуль упругости, как показано в [13]:

$$E = \frac{\sigma_{peak}}{\varepsilon} \left( 1 - \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon_{peak}^n} \right) B \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{peak}} e^{\frac{1}{n} \left( 1 - \frac{\varepsilon^n}{\varepsilon_{peak}^n} \right)} \right)^B. \quad (3)$$

**Результаты.** Используя формулы (1)–(3), рассмотрим пример аппроксимации и определения модуля упругости самана. Экспериментальные данные из статьи [1] показаны на рис. 2 кружками. Аппроксимирующая кривая для предпиковой ветви (сплошная линия на рис. 2 (слева)) для усредненных данных построена по уравнению (1) при  $n = 1,7196$  и  $B = 1,2920$ ,  $\varepsilon_{peak} = 0,0495$ ,  $\sigma_{peak} = 1,01$  МПа. Правая (постпиковая ветвь) кривой построена при  $n = 1,0000$  и  $B = 1,1959$ . Координаты точки перегиба, определенные по аналогии с [13], равны 0,1234 и 0,3319. Аналитически определяемый тангенс угла наклона касательной в точке перегиба определяет модуль упругости  $E = 31,6$  МПа. После округления это значение совпадает с результатами, полученными Polidori et al. [1] (32 МПа).

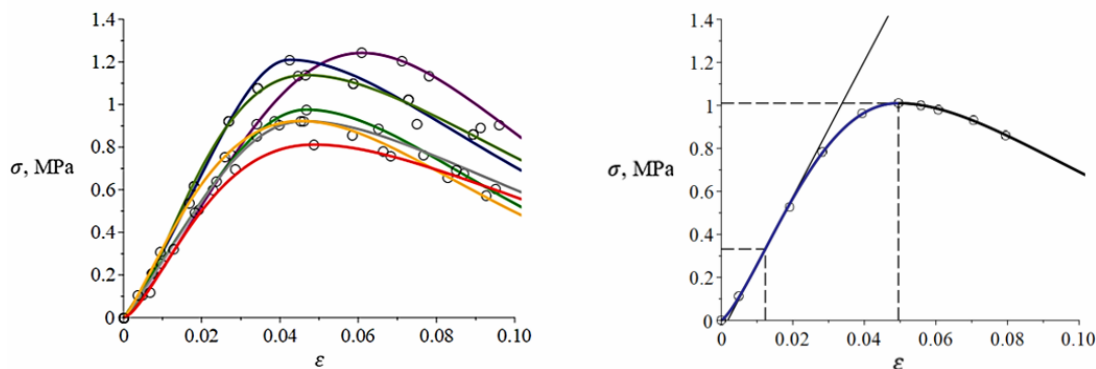


Рис. 2. Семь наборов данных (слева) и аппроксимация их средних значений (справа)

**Обсуждение.** Согласованность результатов аппроксимации и значений модуля упругости с известными по литературе экспериментальными данными из статьи [1] подтверждает достоверность результатов моделирования. Параметры  $n$  и  $B$  в уравнении (1) зависят от физико-механических свойств материала и определяют форму кривой для зависимости напряжений от деформаций (см. рис. 2). Значения этих параметров, а также характеристики пиковой точки  $\varepsilon_{peak}$  и  $\sigma_{peak}$  могут рассматриваться как дополнения к характеристикам материала. Однако для проверки этого предположения необходим анализ большого объема экспериментальных данных. При этом универсальность представленной методики позволяет использовать ее в качестве подходящего исследовательского инструмента для анализа характеристик материалов конструкций исторических зданий с повреждениями [14, 15].

Анализ литературы показал, что саманные технологии отличаются рациональным использованием солнечной энергии и других ресурсов, в связи с чем эти технологии остаются в поле зрения исследователей. Например, известно исследование [16] потенциала 3D-печати аналогов самана в строительстве, результаты которого подчёркивают актуальность сочетания экологически чистых материалов с инновационными (в данном случае аддитивными) технологиями для улучшения строительных практик, иллюстрируя исторически и социально-экономически обусловленные закономерности развития материалов [17] и затронутой технологии домостроения. Необходимым условием технической экспертизы, развития и научной поддержки инновационных технологий производства строительных материалов является совершенствование соответствующих математических моделей разных уровней, во многих из которых используется аппроксимация экспериментальных данных.

**Заключение.** Саманное домостроение на Северном Кавказе достигло своего пика в период с 1830-х по 1880-е годы. В XX веке немногие сохранившиеся саманные дома оставались частью исторического и культурного наследия региона [18, 19], напоминая об образе жизни прошлых поколений и опыте рационального использования таких природных ресурсов, как солнечная энергия и местные материалы в строительстве.

Для моделирования поведения образцов самана и определения модуля упругости предложено использовать метод случайного поиска как более универсальную альтернативу обычно применяемому методу наименьших квадратов. Целесообразность практического использования альтернативной методики моделирования и точность результатов подтверждены их согласованностью с известными по литературе экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. Polidori, G. Adobe Bricks of the Champagne Region (France): Characterization of a Chalky Raw Earth Construction Material / G. Polidori, A. Aras-Gaudry, F. Beaumont, F. Bogaard, S. Murer, M. Lachi, C. Maalouf, T. Moussa, C. Bliard, G. Fronteau [et al.]. – <https://doi.org/10.3390/ma17102307> // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 2307.

2. Silveira, D. Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions / D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046> // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 28, № 1. – P. 36–44.
3. de Castrillo, M.C. Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust / M.C. de Castrillo, I. Ioannou, M. Philokyrou. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516> // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 294. – № 123516.
4. Aspíllaga, A.M.L. Systematic review on the use of biodegradable materials as a sustainable building strategy: Adobe and Tapial / A.M.L. Aspíllaga, E.K.S. Zegarra, L.N.Z. Terrones, A.M.P. Cavada, R.A. González-Lezcano. – <https://doi.org/10.52152/heranca.v7i4.1075> // Herança. – 2024. – Vol. 7(4). – P. 114–131.
5. Leiermann, T. Rehabilitation of historic Shibam and Zabid, Yemen as an impulse for community and economy / T. Leiermann. – <https://doi.org/10.1186/s43238-021-00044-8> // Built Heritage. – 2021. – Vol. 5, № 20.
6. Polidori, G. Analysis of adobes from vernacular raw earth buildings in the Champagne region (France) / G. Polidori, A. Aras-Gaudry, C. Rousse, F. Beaumont, F. Bogard, S. Murer, T. TalaMoussaa, C. Bliardc, G. Fronteaub, E. Hamardd, E. Hamard. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140582> // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 470, 140582.
7. Pihelo P. Performance evaluation and development of prefabricated insulation elements for renovation of apartment buildings with autoclaved aerated concrete external walls / P. Pihelo, T. Kalamees. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115439> // Energy and Buildings. – 2025. – № 115439.
8. Michelini, E. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments / E. Michelini, D. Ferretti, L. Miccoli, F. Parisi. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132996> // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 402. – 132996.
9. Akin S.K. Examining mechanical properties of strengthened aerated concrete masonry walls / S.K. Akin, M. Boztaş. – <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02804> // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – № e02804.
10. Silveira, D. Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks / D. Silveira, H. Varum, A. Costa. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.058> // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 719–728.
11. Hejazi, B. Characterisation of Adobe and Mud–Straw for the Restoration and Rehabilitation of Persian Historical Adobe Buildings / B. Hejazi, C. Luz, F. Grüner, J. Frick, H. Garrecht. – <https://doi.org/10.3390/ma17081764> // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 1764.
12. Adorni, E. In situ characterization of archaeological adobe bricks / E. Adorni, E. Coisson, D. Ferretti. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.004> // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 1–9.
13. Shekov, V. Differential Energy Criterion for Brittle Fracture: Conceptualization and Application to the Analysis of Axial and Lateral Deformation in Uniaxial Compression of Rocks / V. Shekov, G. Kolesnikov. – <https://doi.org/10.3390/ma16134875> // Materials. – 2023. – Vol. 16(13). – № 4875.
14. Gavrillov, T. The Influence of Natural and Climatic Factors on the Wood Biodestruction Process / T. Gavrillov. – DOI: <https://doi.org/10.23649/jae.2022.5.25.01> // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – Vol. 5 (25).
15. Gavrillov T. Study of Patterns of Timber Moisture Changes in the Process of its Decay / T. Gavrillov. DOI: <https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.007> // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – Vol. 8 (28).
16. Tarek, S. Evaluating the role of additive manufacturing in adobe brick enhancement: A comparative study / S. Tarek, Y. Mansour, S. Abdelmohsen, M. Kohail, A. Assem. –

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103298> // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16(3). – № 103298.

17. Будылина, Е.А. Системные исследования в материаловедении / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 4 (49). – С. 48–53.

18. Švarc J. Sociology of innovation: past and prospects / J. Švarc. – <https://doi.org/10.1080/03906701.2025.2450443> // International Review of Sociology. – 2025. – P. 1–30.

19. Денильханов, И. С. Культурные трансформации в жизни чеченского общества к началу XX века / И. С. Денильханов. – doi: 10.18522/2687-0770-2024-1-42-47 // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Общественные науки. – 2024. – Vol. 1 (221). – С. 42–47.

## References

1. Polidori, G. Adobe Bricks of the Champagne Region (France): Characterization of a Chalky Raw Earth Construction Material / G. Polidori, A. Aras-Gaudry, F. Beaumont, F. Bogard, S. Murer, M. Lachi, C. Maalouf, T. Moussa, C. Bliard, G. Fronteau [et al.]. – <https://doi.org/10.3390/ma17102307> // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 2307.

2. Silveira, D. Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions / D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046> // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 28, № 1. – P. 36–44.

3. de Castrillo, M.C. Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust / M.C. de Castrillo, I. Ioannou, M. Philokyprou. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516> // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 294. – № 123516.

4. Aspíllaga, A.M.L. Systematic review on the use of biodegradable materials as a sustainable building strategy: Adobe and Tapial / A.M.L. Aspíllaga, E.K.S. Zegarra, L.N.Z. Terrones, A.M.P. Cavada, R.A. González-Lezcano. – <https://doi.org/10.52152/heranca.v7i4.1075> // Herança. – 2024. – Vol. 7(4). – P. 114–131.

5. Leiermann, T. Rehabilitation of historic Shibam and Zabid, Yemen as an impulse for community and economy / T. Leiermann. – <https://doi.org/10.1186/s43238-021-00044-8> // Built Heritage. – 2021. – Vol. 5, № 20.

6. Polidori, G. Analysis of adobes from vernacular raw earth buildings in the Champagne region (France) / G. Polidori, A. Aras-Gaudry, C. Rousse, F. Beaumont, F. Bogard, S. Murer, T. TalaMoussaa, C. Bliardc, G. Fronteaub, E. Hamardd, E. Hamard. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140582> // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 470, 140582.

7. Pihelo P. Performance evaluation and development of prefabricated insulation elements for renovation of apartment buildings with autoclaved aerated concrete external walls / P. Pihelo, T. Kalamees. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115439> // Energy and Buildings. – 2025. – № 115439.

8. Michélini, E. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments / E. Michélini, D. Ferretti, L. Miccoli, F. Parisi. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132996> // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 402. – 132996.

9. Akin S.K. Examining mechanical properties of strengthened aerated concrete masonry walls / S.K. Akin, M. Boztaş. – <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02804> // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – № e02804.

10. Silveira, D. Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks / D. Silveira, H. Varum, A. Costa. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.058> // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 719–728.

11. Hejazi, B. Characterisation of Adobe and Mud–Straw for the Restoration and Rehabilitation of Persian Historical Adobe Buildings / B. Hejazi, C. Luz, F. Grüner, J. Frick, H. Garrecht. – <https://doi.org/10.3390/ma17081764> // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 1764.
12. Adorni, E. In situ characterization of archaeological adobe bricks / E. Adorni, E. Coisson, D. Ferretti. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.004> // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 1–9.
13. Shekov, V. Differential Energy Criterion for Brittle Fracture: Conceptualization and Application to the Analysis of Axial and Lateral Deformation in Uniaxial Compression of Rocks / V. Shekov, G. Kolesnikov. – <https://doi.org/10.3390/ma16134875> // Materials. – 2023. – Vol. 16(13). – № 4875.
14. Gavrilov, T. The Influence of Natural and Climatic Factors on the Wood Biodestruction Process / T. Gavrilov. – DOI: <https://doi.org/10.23649/jae.2022.5.25.01> // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – Vol. 5 (25).
15. Gavrilov T. Study of Patterns of Timber Moisture Changes in the Process of its Decay / T. Gavrilov. – DOI: <https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.007> // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – Vol. 8 (28).
16. Tarek, S. Evaluating the role of additive manufacturing in adobe brick enhancement: A comparative study / S. Tarek, Y. Mansour, S. Abdelmohsen, M. Kohail, A. Assem. – <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103298> // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16(3). – № 103298.
17. Budylna, E.A. Systematic research in materials science / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – №4 (49). – P. 48–53.
18. Švarc J. Sociology of innovation: past and prospects / J. Švarc. – <https://doi.org/10.1080/03906701.2025.2450443> // International Review of Sociology. – 2025. – P. 1–30.
19. Denilkhanov, I.S. Cultural Transformations in the Life of Chechen Society by the Beginning of the 20th Century / I.S. Denilkhanov – DOI: 10.18522/2687-0770-2024-1-42-47 // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Social Science. – 2024. – Vol. 1 (1). – P. 42–47. (In Russ.).

УДК 691.31

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_52

*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*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

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина

Микроструктура матрицы шлакощелочного камня (ШЩК) модифицирована комплексным наполнителем, состоящим из молотого кварцевого речного песка (МКП) и молотого боя керамического кирпича (МБКК). Изучено влияние 5 % водного раствора сульфата натрия на свойства ШЩК. Результаты исследования показали, что ШЩК с добавлением комплексного модификатора на основе МКП и МБКК обладает устойчивостью к действию сульфатной коррозии при попеременном увлажнении-высушивании образцов. На основании полученных данных произведено моделирование свойств ШЩК при различных интервалах дозирования ингредиентов бетонной смеси. Полученные данные позволяют прогнозировать составы коррозионно-стойких бетонов при минимальных экспериментальных результатах.

*Ключевые слова: граншлак, кварцевый песок, бой керамического кирпича, модификатор, потеря массы образцов, коррозионная стойкость*

## THE INFLUENCE OF COMPOSITE BINDING AGENT COMPOSITION ON CORROSION RESISTANCE OF CONCRETE

I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina

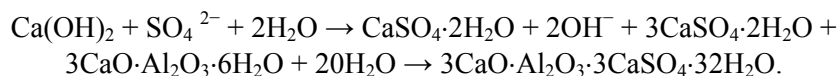
The microstructure of slag-alkali stone (SAL) matrix is modified with a complex filler consisting of ground quartz river sand (GQRS) and ground ceramic brick crushed stone (MCC). The effect of 5 % aqueous sodium sulfate solution on the SAL properties has been studied. The results of the study have shown that SAL with the addition of a complex modifier based on MCP and MCCC is resistant to sulfate corrosion during an alternating cycle of «wetting and drying» of samples. Based on the data obtained, the SAL properties have been modeled at different intervals of dosing the ingredients of the concrete mix. The data obtained allow predicting the compositions of corrosion-resistant concretes with minimal experimental results.

*Keywords: granulated slag, quartz sand, broken ceramic bricks, modifier, loss of mass of samples, corrosion resistance*

**Введение.** На предприятиях химической и металлургической промышленности бетонные конструкции подвергаются воздействию химических растворов и различных газов. Одной из проблем перед исследователями является разработка бетонов, противостоящих сульфатной коррозии, влияющей на долговечность бетонов на основе портландцемента [1, 2]. В результате взаимодействия гидроксида кальция (продукт



гидратации портландцемента) с сульфатами натрия или магния происходят снижение pH среды внутри бетона и образование в цементном камне эттрингита со значительным (более чем в 2 раза) увеличением объема твердых кристаллических фаз, приводящих к расширению и образованию трещин и в конечном счете к разрушению бетона [3, 4].



Таким образом, требуется произвести замену части портландцемента в вяжущем или перейти на вяжущее, не содержащее портландцемента. Рациональное сочетание тонкомолотых компонентов в композиционном вяжущем на основе портландцемента приводит к образованию трёхмерной структуры Si–O–Al [5, 6]. Модифицированная структура цементной матрицы позволяет повысить долговечность бетона за счет уменьшения пористости и увеличения плотности цементного камня [7, 8]. Замена портландцемента на такие компоненты, как метакраин, зола-унос, микрокремнезем, доменный шлак, способствует поглощению расширяющихся продуктов гидратации и повышает стойкость цементного камня к сульфатной коррозии. Кумар Р. с помощью математического планирования эксперимента и функции желательности Деррингера произвел оптимизацию состава бетонной смеси [7, 9]. Применяемая методика показывает высокую точность метода поверхности отклика и эффективность при оптимизации составов бетонной смеси.

В исследовании рассматривались возможность использования молотого кварцевого речного песка (МКП) и молотого боя керамического кирпича (МКК) в качестве модификаторов структуры шлакощелочного вяжущего на основе молодого доменного граншлака. Целью исследования являлось выявление значимости отдельных факторов и их взаимодействия на результаты эксперимента по определению коррозионной стойкости модифицированной матрицы шлакощелочного бетона (ШЩБ) в 5 %-м водном растворе сульфата натрия.

Исследованы три фактора: степень замены молотого доменного граншлака (МГШ) молотыми модификаторами МКК и МКП; соотношение между МКП и МКК; вариация значений растворяющего отношения (Р/В).

Свойства шлакощелочного камня оценивали после 7, 28 и 60 дней твердения. Для построения модели поверхности отклика была принята потеря массы образцов при твердении в водном 5 %-м растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  на протяжении 24 циклов при попеременном увлажнении-высушивании.

**Материалы и методика испытаний.** Доменный граншлак ПО «Северсталь», молотый (МГШ) в шаровой мельнице. В качестве модификаторов структуры ШЩБ применяли МКК и МКП. Результаты рентгеноспектрального анализа используемых порошков представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование материала	Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	Химический состав								
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MgO}$
Молотый граншлак доменного производства (МГШ)	3110	37,28	10,29	0,13	37,41	0,21	0,53	0,672	0,02	12,3
Молотый бой керамического кирпича (МКК)	6780	52,75	13,2	6,22	3,98	0,75	0,25	–	–	2,11
Молотый кварцевый песок (МКП)	8920	99,2	0,67	0,075	0,33	–	0,08	0,025	–	0,21

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что содержание СаО в МБКК примерно в 10 раз меньше, чем содержание СаО в молотом граншлаке. Содержание СаО в МКП в 100 раз меньше, чем в МГШ. Окись кальция – компонент, определяющий реакционную способность доменного граншлака, который обладает низкой самостоятельной реакционной способностью [3,5]. Химический состав боя керамического кирпича в основном состоит из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , СаО и MgO, при этом суммарное содержание этих пяти компонентов в МБКК составляет 78,26 %, а в МГШ – 97,41 %. Содержание  $\text{SiO}_2$  в МБКК и МКП в 1,14 и 2,66 раза выше соответственно, чем в МГШ. Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  примерно в 1,28 раза выше в МБКК, чем в МГШ.

Используемые в качестве модификаторов структуры шлакощелочного камня материалы являются источником реакционной способности и демпферами внутренних напряжений в шлакощелочной матрице.

В качестве контрольных образцов изготавливались балочки  $40 \times 40 \times 160$  мм из шлакощелочного теста, по 24 образца для каждого состава. Образцы готовили в лабораторной смесительной установке, время перемешивания 2 мин. Шлакощелочное тесто заливали в формы и уплотняли на лабораторной виброплощадке. Твердение образцов происходило в формах в камере нормального твердения в течение 24 часов,  $W = (90 \pm 5) \%$ ,  $T = 20 - 25^\circ\text{C}$ . Затем образцы извлекались из форм, помещались в пластиковые контейнеры герметические и продолжали твердеть в камере нормального твердения 7, 28 и 60 дней. В каждый период наблюдения производился отбор образцов и выполнялись исследования влияния 5 %-го раствора сульфата натрия на шлакощелочный камень, а также оценивалась кинетика набора прочности в воздушных и водных условиях твердения. Контрольная серия каждого состава твердела в воде.

В качестве активатора твердения композиционного шлакощелочного вяжущего (ШЩВ) применяли жидкое стекло плотностью  $1,49 \text{ г/см}^3$  и водный раствор NaOH. Дозировка активатора составляла 8 % в пересчете на сухие вещества от композиционного ШЩВ при соотношении NaOH :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \times n \text{ H}_2\text{O}$ , равном 50:50 % [4].

Методика испытания образцов на сульфатную коррозию при попеременном увлажнении-высушивании заключалась в следующем. Образцы выдерживались согласно программе испытаний, а затем высушивались на воздухе при температуре  $25^\circ\text{C}$  в течение 24 часов, при этом полученная масса записывалась как  $M_{m_0}$ . Водный 5 %-й раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  имел  $\text{pH} = 8$ . Партия образцов погружалась в раствор так, что над образцами уровень раствора составлял 20 мм, выдерживались образцы 24 часа, после чего обтирались ветошью и выдерживались при температуре воздуха  $25^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. Такая последовательность испытания составляет один цикл попеременного увлажнения-высушивания. После взвешивания образцов на аналитических весах с точностью до 0,1 г в журнал записывается результат  $M_{m_n}$ . Скорость потери массы рассчитывалась по формуле

$$M_r = \frac{M_{m_n} - M_{m_0}}{M_{m_0}}, \quad (1)$$

где  $M_r$  – средняя величина потери массы образцов (%);  $M_{m_0}$  – средняя начальная масса образцов;  $M_{m_n}$  – средняя масса образцов после  $n$  циклов попеременного увлажнения-высушивания.

Образцы считаются прошедшими испытания, если коэффициент потери массы образцов меньше 5 %, в противном случае они не соответствуют требованиям практического применения (ГОСТ Р 58896-2020 «Бетоны химически стойкие. Методы испытаний»).

Рассмотрим методику определения коэффициента коррозионной стойкости. Коэффициент коррозионной стойкости  $K_c$  исследуемых материалов определяется по формуле (2) и равен величине от деления предела прочности при изгибе  $R_p$  (МПа) образца, погруженного в коррозионный раствор, на соответствующее значение

предела прочности при изгибе  $R_b$  (МПа) контрольного образца, твердевшего в воде (того же состава), для соответствующего программе возраста:

$$K_c = \frac{R_p}{R_b}, \quad (2)$$

где  $R_p$  – предел прочности при изгибе образца, погруженного в коррозионный раствор;  $R_b$  – предел прочности при изгибе образца, погруженного в воду (того же состава), для соответствующего программе возраста.

Составы, результаты испытаний представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Уровни варьирования экспериментальных факторов (переменных)  
и результаты испытаний

№ п/п	Расход компонентов ШЩВ, кг/м <sup>3</sup>				Предел прочности при изгибе, МПа (раствор/вода); $K_{c28,60}$				Потеря массы образцами, %		
	МГШ	МКП	МБКК	Р	28	$K_{c28}$	60	$K_{c60}$	$F_7$	$F_{28}$	$F_{60}$
1	360,0	46,7	46,7	181,4	7,77/6,24	1,25	8,59/7,54	1,14	6,13	6,13	6,13
2	312,9	70,3	70,3	163,2	5,00/4,24	1,18	5,89/5,72	1,03	4,89	4,89	4,89
3	360,0	46,7	46,7	163,2	7,9/7,3	1,08	8,84/7,92	1,12	5,18	5,18	5,18
4	360,0	46,7	46,7	199,5	6,67/5,96	1,12	7,70/6,69	1,15	6,00	6,00	6,00
5	312,9	35,2	105,5	181,4	4,80/4,14	1,16	5,58/4,65	1,2	6,73	6,73	6,73
6	360,0	70,1	23,4	199,5	6,05/5,45	1,11	7,12/6,32	1,13	8,93	8,93	8,93
7	312,9	105,5	35,2	181,4	5,33/4,49	1,19	6,31/5,91	1,07	7,01	7,01	7,01
8	388,8	35,0	11,7	181,4	8,58/7,62	1,12	9,15/8,96	1,02	6,54	6,54	6,54
9	388,8	23,4	23,4	163,2	7,35/6,84	1,07	7,35/7,34	1,00	7,23	7,23	7,23
10	388,8	23,4	23,4	199,5	6,34/5,54	1,14	7,00/6,84	1,02	8,02	8,02	8,02
11	388,8	11,7	35,0	181,4	7,35/5,88	1,25	7,85/7,09	1,11	7,61	7,61	7,61
12	360,0	46,7	46,7	199,5	6,67/5,96	1,12	7,70/6,69	1,15	5,73	5,73	5,73
13	360	23,4	70,1	199,5	5,15/4,43	1,16	5,89/5,00	1,18	7,64	7,64	7,64
14	360	23,4	70,1	163,2	7,45/6,84	1,09	8,05/6,98	1,15	4,23	4,23	4,23
15	360	23,4	70,1	163,2	10,45/7,97	1,31	10,83/10,00	1,08	1,95	1,95	1,95
16	360,0	46,7	46,7	181,4	7,77/6,24	1,26	8,59/7,54	1,14	4,12	4,12	4,12
17	312,9	70,3	70,3	163,2	4,28/4,16	1,03	5,00/4,32	1,16	8,87	8,87	8,87

Из табл. 2 видно, что прочность на изгиб максимальна при дозировке молотого кварцевого песка и молотого боя кирпича 20,6 % и увеличивается на 8,22 % по сравнению с контрольным бетоном в возрасте 28 суток и на 10,5 % в возрасте 60 суток. Прочность на изгиб у образцов с дозировкой МКП и МБКК 10,3 % и 31 % ниже, чем у контрольного бетона. Это свидетельствует о том, что при оптимальном соотношении модификаторов ШЩВ можно увеличить прочность ШЩК за счёт оптимизации структуры, плотности и содержания МБК после замещения МГШ, что, в свою очередь, повышает коррозионную стойкость. Установлено, что с увеличением дозировки МКП прочность на изгиб в воде значительно снижается. Темп снижения наиболее медленный при уровне замещения от 10,3 до 20,6 %. По мере увеличения дозировки МБКК система вяжущего не может образовывать достаточное количество продуктов гидратации для заполнения капиллярных пор, что приводит к недостаточной плотности цементной матрицы и снижению прочности.

На рис. 1 показана зависимость между расходом МКП и МБКК и прочностью на изгиб образцов шлакощелочного камня, выдержанных в течение 28 и 60 дней, погруженных в воду и погруженных в агрессивный 5 %-й раствор сульфата натрия. Из рис. 1 можно заметить, что прочность на изгиб максимальна при дозировке в смеси модификатора МКП 50 % в возрасте 28 суток. В возрасте 60 суток наибольший результат прочности на изгиб получен при дозировке в комплексном модификаторе МКП 75 %.

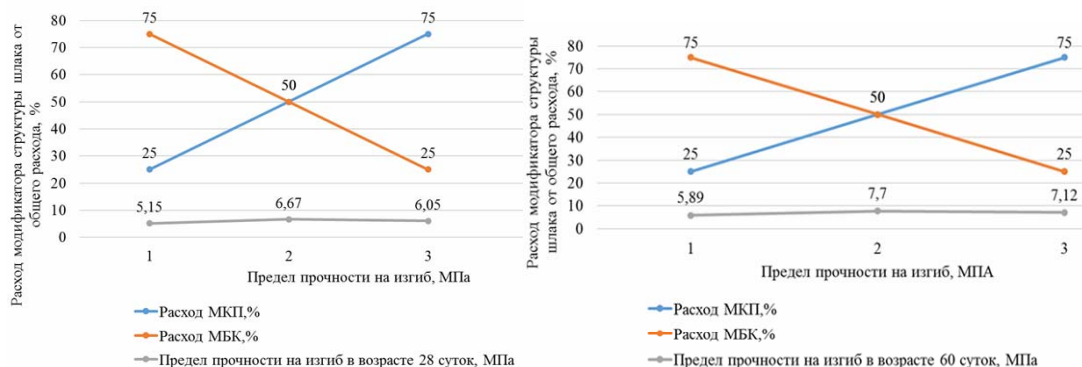


Рис. 1. Зависимость предела прочности ШЩК на изгиб от расхода МКП и МБКК, подвергшихся 24 циклам попеременного увлажнения-высушивания;  $P/B=0,44$ ; (МКП+МБКК) – 20,6 %

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента коррозионной стойкости образцов в 5 %-м растворе  $Na_2SO_4$  от величины замены модификатором молотого гранулированного шлака. Полученные данные показывают, что стойкость шлакощелочного камня на всем этапе наблюдения выше показателей аналогичных бетонов, твердевших в водных условиях.

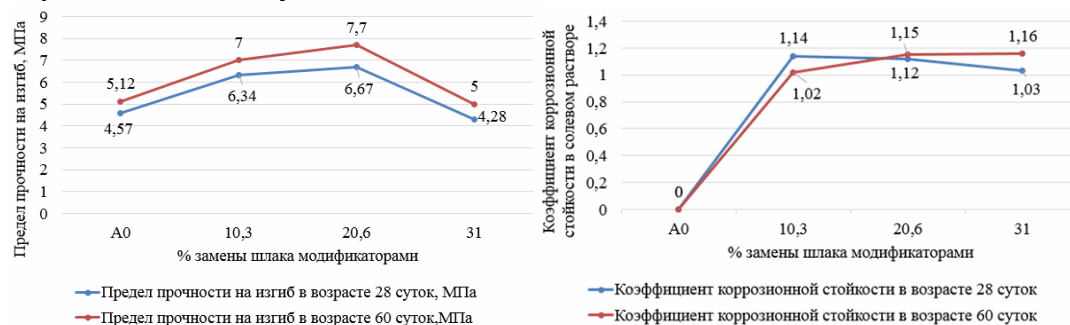


Рис. 2. Изменение прочности на изгиб и коэффициента коррозионной стойкости образцов из ШЩК, подвергшихся 24 циклам попеременного увлажнения-высушивания, с заменой МГШ модификаторами структуры от 0 до 31 %

Уменьшение  $P/B$ -отношения способствует снижению не только пористости шлакощелочного камня, но и размеров самих пор, в результате значительно повышаются плотность и стойкость шлакощелочной матрицы против сульфатной коррозии.

По мере увеличения содержания МКП степень снижения прочности уменьшается, что указывает на то, что МКП может повысить коррозионную стойкость матрицы. На рис.2 показана прочность на изгиб образцов, подвергшихся 24 циклам воздействия влажной и сухой среды и сульфатной коррозии, с заменой МГДШ в диапазоне от 0 до 31 %. Установлена зависимость между коэффициентом коррозионной стойкости и дозировкой комплексного модификатора (МКП+МБКК), заменяющего молотый граншлак. Можно отметить, что по мере увеличения доли замещения МКП коррозионная стойкость значительно повышается. Однако после превышения уровня замещения в 50 % коррозионная стойкость начинает немного снижаться. В целом шлакощелочная матрица с МКП+МБКК обладает более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с МГДШ.

Был проведен анализ поверхности отклика на потерю массы образцов шлакощелочной матрицы. Кинетика изменения массы образцов шлакощелочной матрицы после 24 циклов воздействия попеременного увлажнения-высушивания и сульфатной коррозии в возрасте твердения 7, 28 и 60 дней принимается в качестве исходной переменной в модели (рис. 3). Всего было протестировано 17 составов.

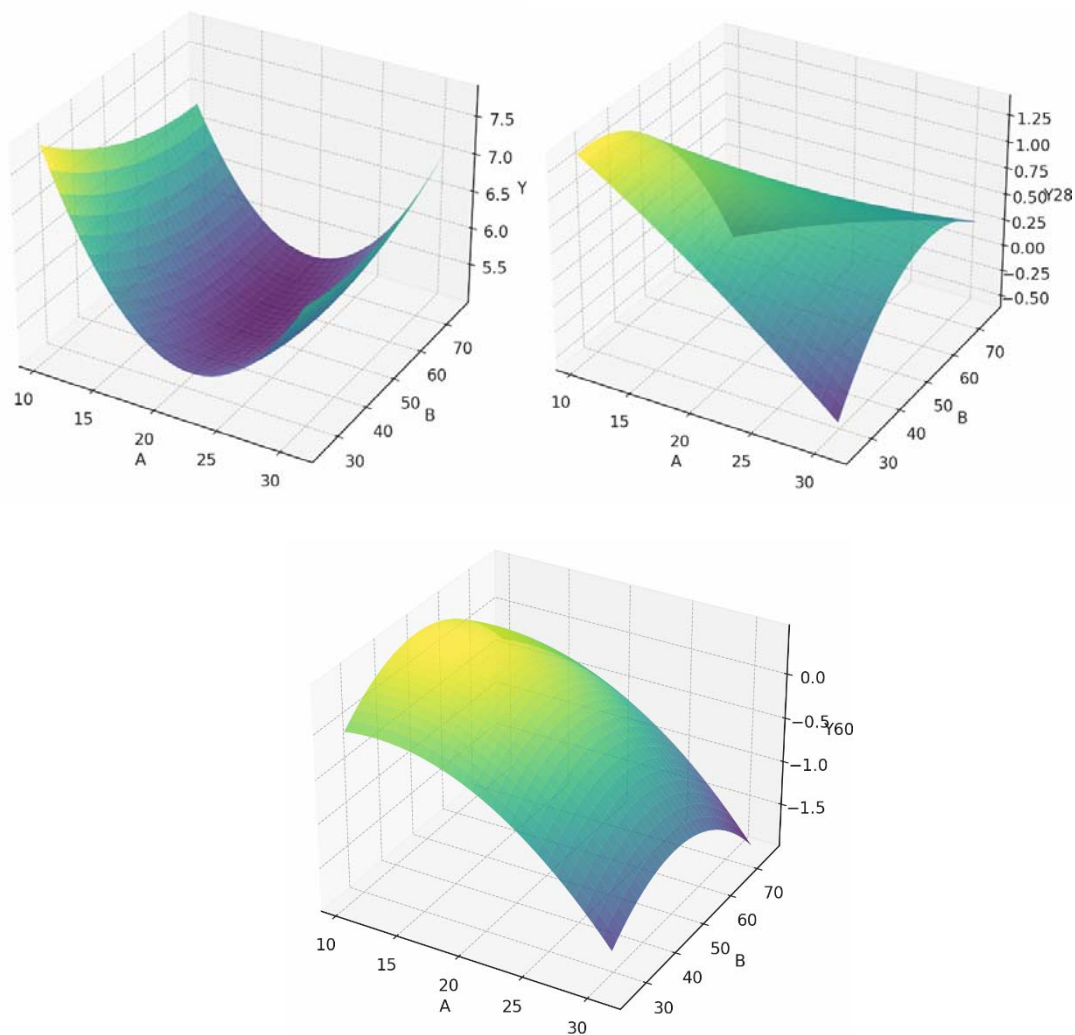


Рис. 3. 3D-график поверхности отклика для 7, 28 и 60 суток по факторам:  
 А – % замены МГШ на комплексный модификатор; В – соотношение между МКП и МБКК  
 при фиксированном «С» – растворяющем отношении  $P/B = 0,40$  (среднее значение)

Потеря качества шлакощелочной матрицы определяется пропорциями между МКП и МБКК, массовым соотношением молотого шлака и модификаторов, а также соотношением расхода раствора щелочного активатора твердения и шлакощелочного вяжущего. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 2.

Составы, которые потеряли массу более 1 %, считаются не коррозионно-стойкими. Так, на 7-е сутки испытаний все образцы имели потерю массы более 1 %, в возрасте 28 суток у составов № 4, 10, 11, 13 потеря массы более 1 %. В возрасте 60 суток все составы имеют потерю массы менее 1 %.

Реакционная способность модифицированного шлакощелочного вяжущего стимулируется вторичной реакцией гидратации в возрасте 28-суточного твердения (МБКК), в результате уменьшается потеря массы шлакощелочной матрицы из-за коррозии.

Кривая поверхность (см. рис. 3) показывает, что  $P/B$  является важным показателем, влияющим на устойчивость матрицы к коррозии в раннем возрасте. Как показано в табл. 2, эффект взаимодействия А, В оказывает значительное влияние на коррозионную стойкость шлакощелочной матрицы после 7 дней отверждения. Модификаторы вяжущего ведут себя иначе, чем процессы гидратации ШЩВ, что приводит к колебаниям содержания активатора. При анализе было обнаружено, что раствор сульфата натрия проникает в поры шлакощелочного камня и образует расширяющиеся продукты коррозии внутри образцов. Давление продуктов коррозии при кристалли-

зации превышает предел прочности на разрыв материала матрицы, в результате разрушается внутренняя структура. Более высокое значение Р/В приводит к образованию большого количества пор и капилляров, повышается проницаемость для сульфатов, что способствует большей потере массы образцов, что характерно для раннего возраста твердения.

Результаты, представленные в табл. 3 показывают, что А, В и С при взаимодействии способствуют формированию матрицы, устойчивой к сульфатной коррозии в возрасте 28 суток твердения. Если принять Р/В-отношение за среднее значение, то линии влияния взаимодействия факторов А и В показаны на рис. 3. Видно, что при увеличении дозировки модификаторов структуры шлакощелочного камня скорость изменения массы образцов сначала увеличивается, а затем уменьшается, достигая максимальной скорости изменения при 31 % степени замещения шлака и содержании МБКК 75 %, что указывает на наименьшую устойчивость к коррозии. Кроме того, при увеличении Р/В потеря массы матрицы после 28 дней твердения сначала уменьшается, а затем увеличивается. На рис. 3 видны отчётливые эллиптические кривые в пределах контурных линий поверхности отклика, указывающие на очень сильное взаимодействие А, В. Это можно объяснить наличием значительного количества гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, алюмината кальция и гидроксида кальция в продуктах гидратации ШЩВ. Реакция сульфатов с этими соединениями приводит к образованию расширяющегося этtringита, в результате образуются трещины и разрушаются образцы. Таким образом, оптимальная дозировка МБКК в ШЩВ вместо молотого граншлака может снизить расход шлака, уменьшить образование продуктов коррозии и эффективно противостоять сульфатной коррозии.

#### Выводы

1. Введение в шлакощелочное вяжущее только МБКК в количестве 15-30 % вызывает снижение прочности шлакощелочного камня относительно контрольного состава. В то же время присутствие в шлаковой матрице МБКК способствует связыванию непрореагировавшей щелочи и устранению высолов на поверхности образцов.
2. Анализ влияния выделенных факторов на кинетику изменения массы шлакощелочных образцов после коррозионных испытаний показал, что в возрасте 7 дней определяющим фактором коррозионной стойкости является растворяющее отношение, в возрасте 28 суток – расход молотого боя керамического кирпича, в возрасте 60 дней – соотношение между МКП и МБКК.

#### Список литературы

1. Zou, Y.S. Effect of fly ash and chlorides on sulfate attack in mixed cement pastes / Y.S. Zou, S.B. Zou, H.L. Zhang, S.Q. Wang // *Construction and Building Materials*. – 2023. – 394: 132231.
2. Lv, X.D. Role of fly ash, granulated blast furnace slag and silica in long-term resistance to external sulfate attack at atmospheric temperature / X.D. Lv, L. Yang, J.Z. Li, F.Z. Wang // *Cement and Concrete Composites*. – 2022. – 133: 104696.
3. Романенко, И.И. Коррозионная стойкость шлакощелочных бетонов в органических средах / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, Э.М. Пинт, М.И. Романенко // *Региональная архитектура и строительство*. – 2013. – № 1. – С. 42–51.
4. El-Hassan, H. Effect of curing mode on the performance characteristics and microstructure of alkali-activated slag-alkali concrete / H. El-Hassan, E. Shehab, A. Al-Sallamin // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. – 2021. – 10 (5). – P. 289–317.
5. Романенко, И.И. Строительные материалы на основе активированного сталеплавильного шлака / И.И. Романенко, А.И. Фадин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2023. – № 1 (54). – С. 85–92.
6. Marzouki, M. Application of Plackett-Burman and Box-Behnken Methods to Optimize Tunisian Sedimentary Geopolymers / M. Marzouki, B. Samet, H. Tounsi // *Journal of Civil Engineering*. – 2022. – 50: 104162.

7. Kumar, R. Effect of large amount of dolomite slurry on the properties of green lightweight concrete: Microstructure, statistical modeling, multi-attribute optimization using Derringer desirability function, and life cycle assessment / R. Kumar // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – 307: 127107.
8. Романенко, И.И. Модифицирование вяжущего тонкомолотыми компонентами / И.И. Романенко, И.Н. Петровнина, М.И. Романенко // *Дневник науки*. – 2018. – № 2 (14). – С. 10–17.
9. Kaya, M. Effect of sodium and magnesium sulfate on the physicomaterial and microstructural properties of kaolin-ceramic powder geopolymer mortar [J] / M. Kaya, F. Koksall, M. Nodehi, M. Bayram, O. Gencel, T. Ozbakkaloglu // *Sustainability*. – 2022. – 14: 13496.

### References

1. Zou, Y.S. Effect of fly ash and chlorides on sulfate attack in mixed cement pastes / Y.S. Zou, S.B. Zou, H.L. Zhang, S.Q. Wang // *Construction and Building Materials*. – 2023. – 394: 132231.
2. Lv, X.D. Role of fly ash, granulated blast furnace slag and silica in long-term resistance to external sulfate attack at atmospheric temperature / X.D. Lv, L. Yang, J.Z. Li, F.Z. Wang // *Cement and Concrete Composites*. – 2022. – 133: 104696.
3. Romanenko, I.I. Corrosion resistance of slag-alkali concretes in organic environments / I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina, E.M. Pint, M.I. Romanenko // *Regional Architecture and engineering*. – 2013. – No. 1. – P. 42–51.
4. El-Hassan, H. Effect of curing mode on the performance characteristics and microstructure of alkali-activated slag-alkali concrete / H. El-Hassan, E. Shehab, A. Al-Sallamin // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. – 2021. – 10 (5). – P. 289–317.
5. Romanenko, I.I. Building materials based on activated steel slag / I.I. Romanenko, A.I. Fadin // *Regional Architecture and engineering*. – 2023. – No. 1 (54). – P. 85–92.
6. Marzouki, M. Application of Plackett-Burman and Box-Behnken Methods to Optimize Tunisian Sedimentary Geopolymers / M. Marzouki, B. Samet, H. Tounsi // *Journal of Civil Engineering*. – 2022. – 50: 104162.
7. Kumar, R. Effect of large amount of dolomite slurry on the properties of green lightweight concrete: Microstructure, statistical modeling, multi-attribute optimization using Derringer desirability function, and life cycle assessment / R. Kumar // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – 307: 127107.
8. Romanenko, I.I. Modification of binder with finely ground components / I.I. Romanenko, I.N. Petrovnina, M.I. Romanenko // *Science Diary*. – 2018. – No. 2 (14). – P. 10–17.
9. Kaya, M. Effect of sodium and magnesium sulfate on the physicomaterial and microstructural properties of kaolin-ceramic powder geopolymer mortar [J] / M. Kaya, F. Koksall, M. Nodehi, M. Bayram, O. Gencel, T. Ozbakkaloglu // *Sustainability*. – 2022. – 14: 13496.

Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46,  
тел. (4722) 55-15-91

**Сальникова Алёна Сергеевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Теоретическая механика  
и сопротивление материалов»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Елистраткин Михаил Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия и конструкции»  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

**Казлитина Ольга Викторовна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение, изделия и конструкции»  
E-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

**Поспелова Елена Алексеевна**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры «Стандартизация и управление  
качеством»  
E-mail: posp\_el@mail.ru

Belgorod State Technological University  
named after V.G. Shukhov  
(BSTU named after V.G. Shukhov)

Russia, 308012, Belgorod, 46, Kostyukova St.,  
tel. (4722) 55-15-91

**Salnikova Alyona Sergeevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Theoretical Mechanics and  
Strength of Materials»  
E-mail: privet.9292@mail.ru

**Elistratkin Michail Yuryevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
«Building Materials, Products and Structures»  
E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru

**Kazlitina Olga Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Building Materials, Products  
and Structures»  
E-mail: olga-ivashova1@yandex.ru

**Pospelova Elena Alekseevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
«Standardization and Quality Management»  
E-mail: posp\_el@mail.ru

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда  
(проект №25-19-00866), с использованием оборудования Центра высоких технологий  
БГТУ им. В.Г. Шухова.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОАРМИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

А.С. Сальникова, М.Ю. Елистраткин, О.В. Казлитина, Е.А. Поспелова

Разработана технология получения добавки микроармирующей цементный камень, применяемой в самоуплотняющихся смесях для изготовления тонкостенных многослойных стеновых изделий. Были определены оптимальные параметры дисперсии стеклянной и базальтовой фибры для получения разработанной добавки, а также рассмотрено ее влияние на свойства бетонной смеси и бетона.

Стоит отметить, что разработанная добавка, микроармирующая цементный камень, входит в состав композиционного вяжущего, что обеспечивает максимальную технологичность и повышение прочности при сжатии до 20...25 %.

*Ключевые слова:* композиционное вяжущее, высокопрочный бетон, самоуплотняющаяся смесь, добавка микроармирующая цементный камень

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MICRO-REINFORCING ADDITIVES ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SELF-SEALING CONCRETE

A.S. Salnikova, M.Yu. Elistratkin, O.V. Kazlitina, E.A. Pospelova

The work has developed a technology for obtaining a micro-reinforcing additive for cement stone used in self-compacting mixtures for obtaining thin-walled hollow-core wall products. Optimum parameters for dispersion of glass and basalt fiber have been determined for obtaining the developed



additive, and its effect on the properties of concrete mixture and concrete is also considered. It is worth noting that the developed micro-reinforcing additive for cement stone is part of the composite binder, which ensures maximum processability and increased compressive strength up to 20...25 %.

*Keywords: composite binder, high-strength concrete, self-compacting mixture, micro-reinforcing cement stone additive*

**Введение.** В настоящее время дисперсное армирование бетонов и растворов волокнами широко применяется [1, 2] ввиду значительного улучшения физико-механических свойств изделий [3, 4]. Номенклатура искусственных волокон-фибр весьма обширна, однако наибольшее распространение получили стальные, стеклянные, базальтовые и полипропиленовые волокна. Упрочнение бетонов и растворов данными волокнами происходит при условии, что материал бетонной матрицы передает волокнам растягивающие напряжения посредством касательных сил, действующих на поверхности раздела [5]. В этой связи ввиду низкого модуля упругости полипропиленовые волокна не рассматриваются как упрочняющие, а служат для повышения стойкости против истирания, снижения хрупкости и решения технологических задач.

Использование дисперсного армирования применительно к высокопрочным или особовысокопрочным бетонам позволяет получать тонкостенные изделия, которые стали набирать все большую популярность в разных сферах строительства. Благодаря применению высокопрочного бетона изделия имеют высокую прочность на сжатие, и из него можно изготавливать весьма тонкие, очень легкие и эффективные строительные конструкции, а армирование увеличивает прочность на изгиб и стойкость к хрупкому разрушению. Это позволяет экономить материал и соответственно снижать затраты. Кроме того, открываются возможности производства совершенно новых видов конструкций – это сборные тонкостенные элементы в виде балок, тонкостенные гнутоформованные конструкции для строительства павильонов [6], тонкостенные ступени, тонкостенные многопустотные стеновые блоки и др.

Для получения многопустотных тонкостенных изделий различной конфигурации (рис. 1) определяющим моментом является выбор способа производства изделия. Так, например, наиболее распространённым способом получения пустотелых блоков является прессование или вибропрессование с использованием тяжелого или лёгкого бетона на пористых заполнителях. Однако эти способы изготовления изделий имеют свои недостатки: они более энергозатратны и требуют в основном применения ТВО [7], а при прессовании изделия имеют рыхлую поверхность и недостаточную плотность. При этом основная проблема заключается в сложности получения более тонких стенок изделий (до 3-10 мм). Поэтому для преодоления этих недостатков наиболее подходящим способом, на наш взгляд, является литьевой метод изготовления.

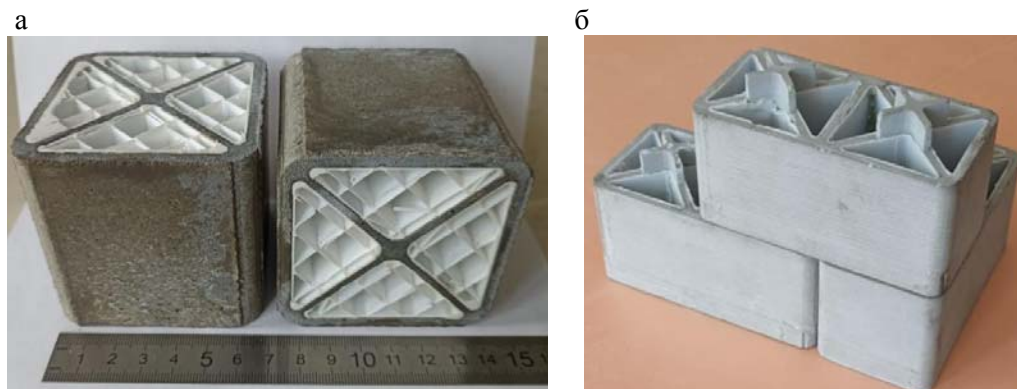


Рис. 1. Пример исполнения тонкостенного блока:

а – образцы кубической формы; б – образцы с X-образной стыковой системой соединения типа «лего-блок»

При данном способе изготовления изделий целесообразно использовать самоуплотняющиеся бетонные смеси, что позволит избежать их расслоения, а также

выпускать изделия с гладкой, ровной и плотной поверхностью. Ввиду необходимости получения стенок изделия толщиной 3-10 мм в составе используется только мелкий заполнитель [8, 9].

Однако принятый способ изготовления возвращает к проблеме хрупкости изделий, поэтому во избежание данного побочного явления желательно использовать армирование фиброволокнами. Согласно источникам [10, 11], армирование фиброволокнами в самоуплотняющихся бетонных смесях достаточно распространено, но такие армированные самоуплотняющиеся смеси применяются для создания высокопрочных полнотелых изделий, и возникает вопрос возможности их использования в тонкостенных изделиях. Поскольку средняя длина фиброволокон составляет 12-24 мм и более, то, вероятно, при заполнении стенок толщиной 3-10 мм они будут ориентироваться по направлению течения смеси с понижением эффективности армирования или, вообще, могут затруднять проникновение смеси в узкие пространства.

Из вышесказанного следует, что традиционные методы дисперсного армирования требуют адаптации при армирования изделий, имеющих толщину стенок и перегородок 3-10 мм, для сохранения высокой текучести системы. Возможным решением данной задачи, на наш взгляд, является уменьшение размеров фибры с переносом ее действия на меньший масштабный уровень – уровень цементного камня, что позволит реализовать основные положительные эффекты армирования самоуплотняющихся смесей для тонкостенных изделий без ущерба для специальных свойств. Этим обуславливаются значимость и актуальность проведенных исследований.

Целью исследований стала разработка добавок, микроармирующих цементный камень (ДМЦК), на основе базальтового и стеклянного фиброволокна и изучение их влияния на свойства высокопрочных мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов, используемых для получения тонкостенных изделий.

**Результаты и анализ.** Разработанные добавки, микроармирующие цементный камень (табл. 1), представляют собой двухкомпонентную систему (частично размолотый кварцевый песок и волокна фибры) с частицами различных размеров и формы (рис. 2).

Т а б л и ц а 1

Состав и характеристики ДМЦК

№	Вид фибры	Технологический компонент	Сокращенное название	Время обработки, мин	Полученная длина волокон, мм	Исходная длина волокна, мм	Соотношение технологический компонент: фибра
1	Стекланная (С)	Кварцевый песок	ДМЦК-С-6	6	0,17-0,52	12±2	2:1
2			ДМЦК-С-8	8	0,08-0,57		
3			ДМЦК-С-12	12	0,05-0,44		
4			ДМЦК-С-20	20	0,01-0,20		
5	Базальтовая (Б)		ДМЦК-Б-8	8	0,06-0,49	24	
6			ДМЦК-Б-12	12	0,07-0,58		

Ввиду выбранного способа получения разработанных добавок и изначальных характеристик товарных фибр выбор остановился на базальтовом и стеклянном фиброволокне. Известно, что прочность базальтовой фибры выше прочности стеклянной фибры, поэтому при одинаковых условиях и времени обработки у данных добавок получены разные длины волокон. Так, например, при времени обработки 12 минут базальтовые волокна по сравнению со стеклянными примерно на 0,02–0,14 мм длиннее (см. табл. 1).

Кварцевый песок в данном случае выступает как важный технологический компонент и выполняет три функции: обеспечивает измельчение волокон, предотвращает их комкование при хранении и введении в смесь, а также выступает в качестве

дисперсного наполнителя. Частицы песка, частично диспергированные в процессе обработки, по сравнению с обычным песком играют в композиционном вяжущем роль более мелкого наполнителя, что положительно влияет на прочностные характеристики конечного композита за счёт уплотнения его структуры [12].

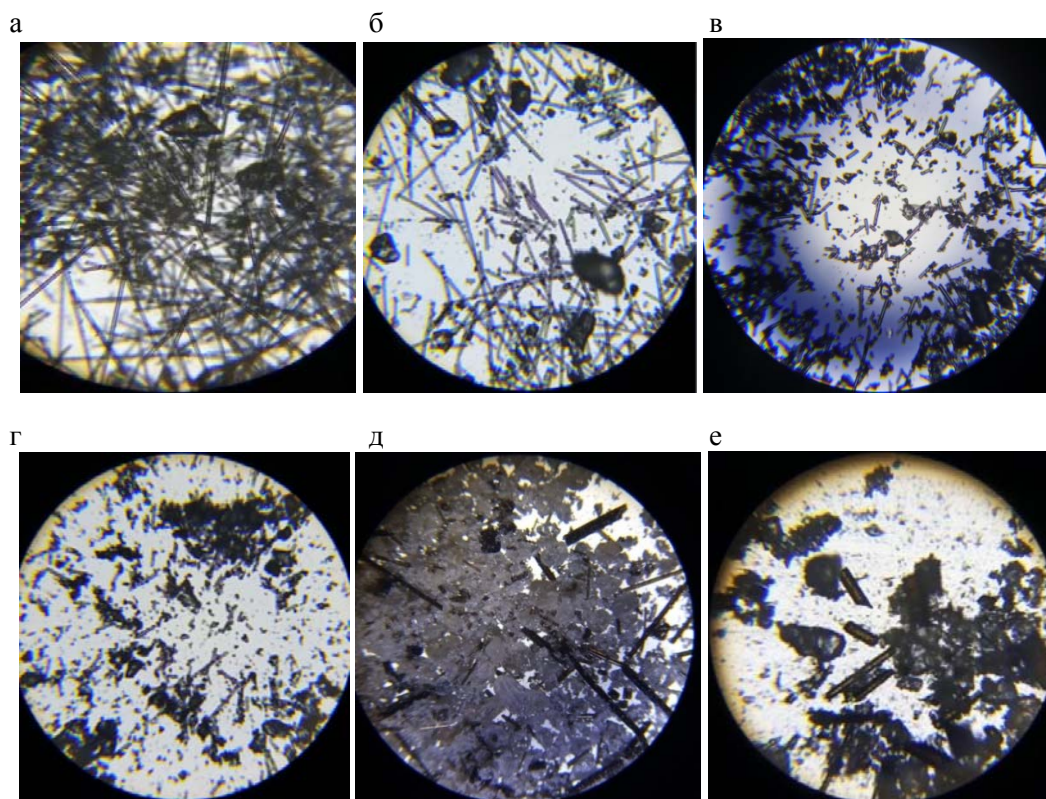


Рис. 2. Вид ДМЦК под микроскопом (диаметр видимого поля 1,4 мм):  
а – ДМЦК-С-6; б – ДМЦК-С-8; в – ДМЦК-С-12;  
г – ДМЦК-С-20; д – ДМЦК-Б-8; е – ДМЦК-Б-12

С целью оценки влияния разработанных ДМЦК на прочностные свойства бетона и определения наиболее эффективных на первом этапе провели лабораторные испытания традиционных несамоуплотняющихся составов на разных цементах (ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС ОАО «Новоросцемент»). В качестве контрольных компонентов использовали механообработанный кварцевый песок (для определения чистого влияния технологического компонента добавки) и базальтовую модифицированную тонкоизмельченную фибру CemFibra R (марки СЕММИХ, Россия), которая имеет минимальный размер волокон из доступных товарных, добавки вводились взамен части вяжущего. Опыты проводили при одинаковых условиях – с одинаковым водоцементным отношением, равным 0,45, и соотношением компонентов Ц:П 1:3 (рис. 3).

Микроармирующие добавки вводились взамен соответствующей части цемента. Выбор, наряду с обычным, сульфатостойкого цемента с пуццолановой добавкой обусловлен целью создания фиброволокнам лучших условий для их сохранности, так как в щелочной среде бетона они подвергаются коррозии, вследствие чего происходит снижение прочности бетона.

Анализируя графики на рис. 3, можно отметить, что уже на 7-е сутки прочность камня при введении ДМЦК-С на ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС выше, чем на ЦЕМ I 42,5Н. Эта тенденция сохраняется и в марочном возрасте. Контрольные образцы с базальтовой фиброй CemFibra R продемонстрировали в среднем сопоставимый, но уступающий лучшим из разработанных составов уровень прочности. При этом фибра CemFibra R имеет существенно более низкую технологичность введения (комкование, неравномерное распределение в объёме), характерную для большинства видов подобных материалов.

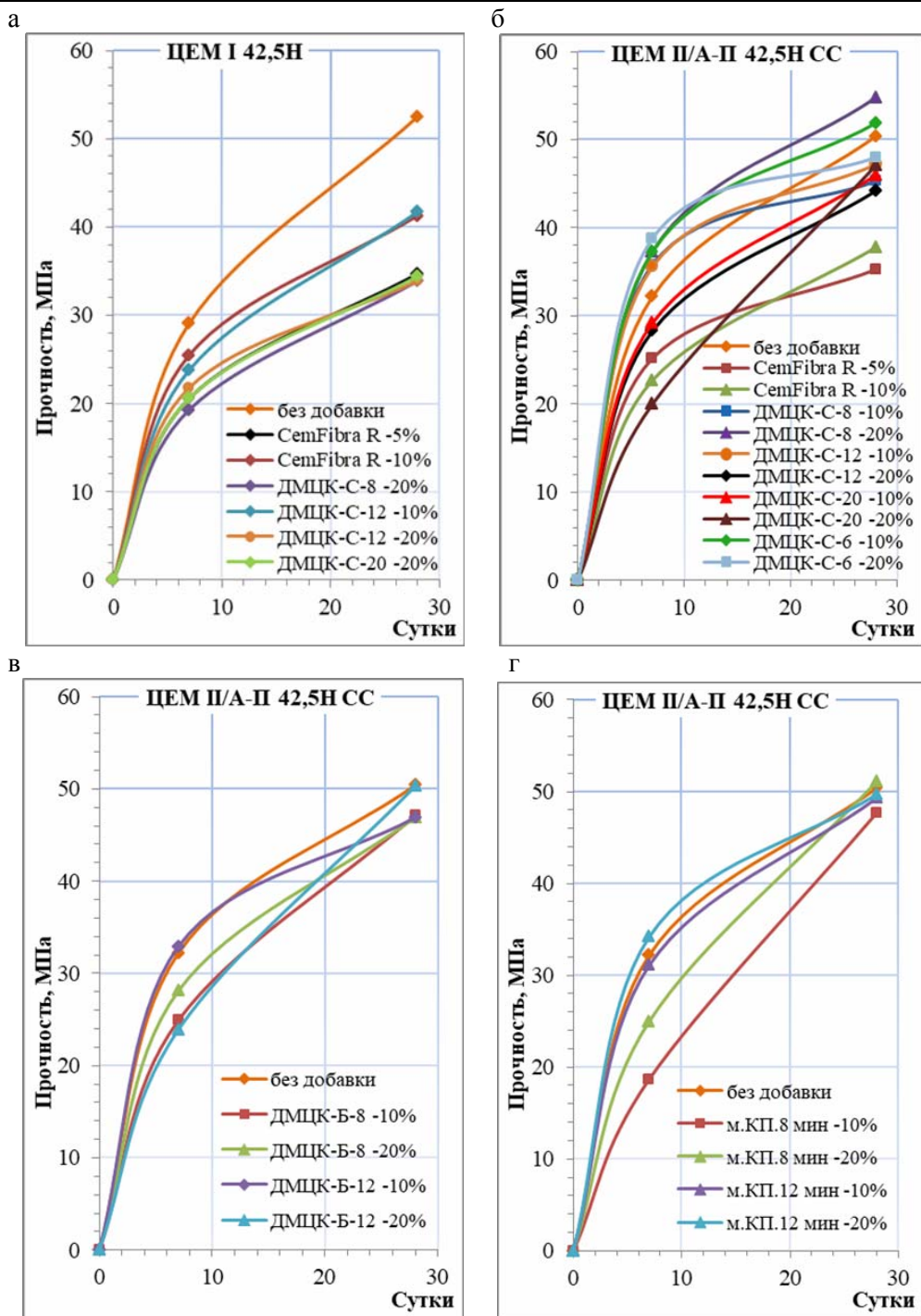


Рис. 3. Прочностные показатели образцов с разными видами армирующих добавок:  
а – на ЦЕМ I 42,5Н; б, в, г – на ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС с разными видами добавок

Лучшие результаты показали составы с микроармирующей добавкой на основе стеклянной фибры (длина волокон 0,08-0,57 мм и 0,16-0,52 мм соответственно) и с микроармирующей добавкой на основе базальтовой фибры (длина волокон 0,29-0,15 мм), которые были приняты для дальнейшего изучения.

Следующим этапом стало определение влияния разработанной добавки на свойства самоуплотняющейся бетонной смеси, а именно на удобоукладываемость (табл. 2) [13, 14], вязкость и текучесть, которые являются ключевыми свойствами для самоуплотняющихся бетонных смесей при создании тонкостенных многпустотных стеновых изделий.



Для получения самоуплотняющихся бетонов применяли пластификатор MC-PowerFlow 3100 RU производства MC-Bauchemie в дозировке 1 % от массы вяжущего, что позволило увеличить подвижность смеси, снизить В/Ц до 0,2, а также придать ей способность к самоуплотнению. Для обеспечения максимальной раздвижки зерен и получения эффекта «плавающего заполнителя», что необходимо для максимальной реализации самоуплотнения, исследованные составы мелкозернистых бетонов имели соотношение компонентов вяжущее : песок = 1 : 1.

Для обеспечения фиброволокнам, входящим в состав разработанной добавки, дополнительной защиты от коррозии в щелочной среде, а также экономии клинкерной составляющей последующие исследования проводились на композиционном вяжущем на основе сульфатостойкого цемента (КВс70(ТБ)) и с добавлением в некоторые составы микрокремнезема (марки CENTRILIT FUME S, производства MC-Bauchemie).

Т а б л и ц а 2

Удобоукладываемость бетонных смесей в зависимости от состава

№ п/п	Добавки		Расплыв по конусу Абрамса, см	Марка по удобоукла- дываемости	Время расплыва смеси до 500 мм, с	Марка по вязкости
	ДМЦК-С-12, %	МК, %				
1	20	5	65	PK1	3.3	V2
2	20	-	68	PK2	2.7	
3	10	5	67	PK2	2.9	
4	10	-	69	PK2	2.5	
5	-	5	67	PK2	3.0	
6	-	-	70	PK2	2.3	

Анализируя табл. 2, видим, что введение микрокремнезема во всех составах снижает величину расплыва смеси. Добавка ДМЦК-С-12 при 10 % дозировке незначительно влияет на расплыв смеси, а при увеличении дозировки до 20 % расплыв смеси снижается примерно на 1,5-3 %. У всех составов диаметры расплыва самоуплотняющихся смесей соответствуют требуемым значениям и находятся в пределах 50-70 см по стандартному конусу. Расслоения смесей во время испытаний не наблюдалось.

Текучесть самоуплотняющейся смеси обеспечивает способность равномерно распределяться по всему объему опалубки даже при высоком насыщении арматурой без необходимости уплотнения. Предпосылками для обеспечения данного свойства являются высокая удобоукладываемость, низкое предельное сопротивление сдвигу, которое предопределяет высокую текучесть смеси, и повышенная вязкость, которая обеспечивает стабильность и связность смеси. Существует несколько способов определения текучности [15], однако стоит отметить, что ни один из них не определит способность смеси протекать в узкие пространства, что имеет значение при получении тонкостенных изделий сложной конфигурации. Этим обусловлено проектирование формы из экструдированного пенополистирола (рис. 4, а, б), основанной на U-тесте (рис. 4, в), который обеспечивает наглядное сравнение составов в ситуации, приближенной к производственной и позволяющей оценить проникающую способность бетона без внешнего воздействия.

Для проведения испытаний было выбрано несколько составов (табл. 3). В составах, содержащих товарную фибру, на основании результатов предварительных испытаний водоцементное отношение было увеличено для придания смеси повышенной текучности.

После затвердевания смеси форма была разобрана (рис. 5). Как и ожидалось при проведении испытаний, бетонная смесь на составе 2 с фиброй «Крепыш» плохо заполняла форму и полностью ее не заполнила (рис. 5, а), застопорившись на изгибе. Бетонный образец при этом имеет шероховатую поверхность со множеством пор и пустот, что подтверждает низкую проникающую способность смеси.

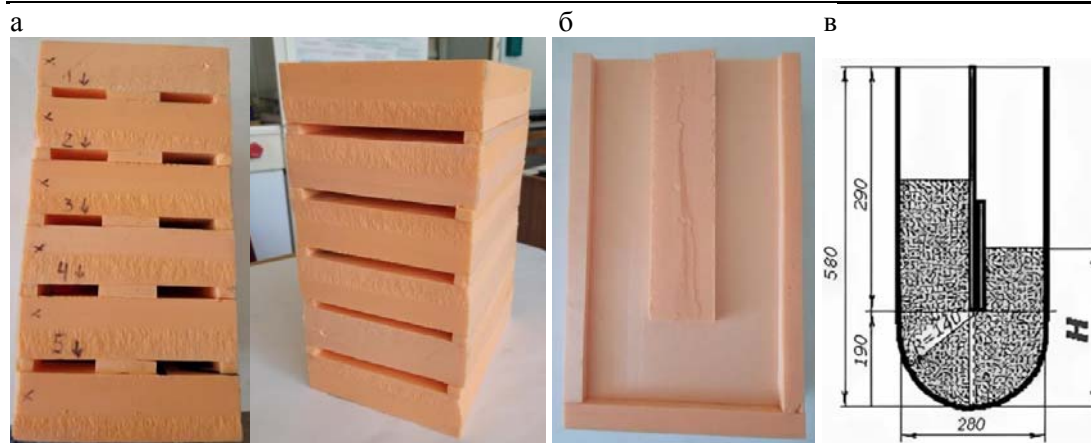


Рис. 4. Форма для испытания смесей:

а – общий вид формы; б – внутреннее строение формы; в – схема испытаний U-Test

Т а б л и ц а 3

Составы для определения текучести

№ п/п	Добавка	В/Ц	Примечание
1	-	0,2	Быстро и легко заполняет форму
2	Стекловолоконная фибра «Крепыш», 1,1 %	0,22	Способность к самоуплотнению пропала
3	Базальтовая фибра «СемФибра R», 1,1 %	0,22	С трудом заполняет форму
4	ДМКЦ-С-12, 20 %	0,2	Быстро и легко заполнил форму
5	ДМКЦ-Б-12, 20 %	0,2	Быстро и легко заполнил форму

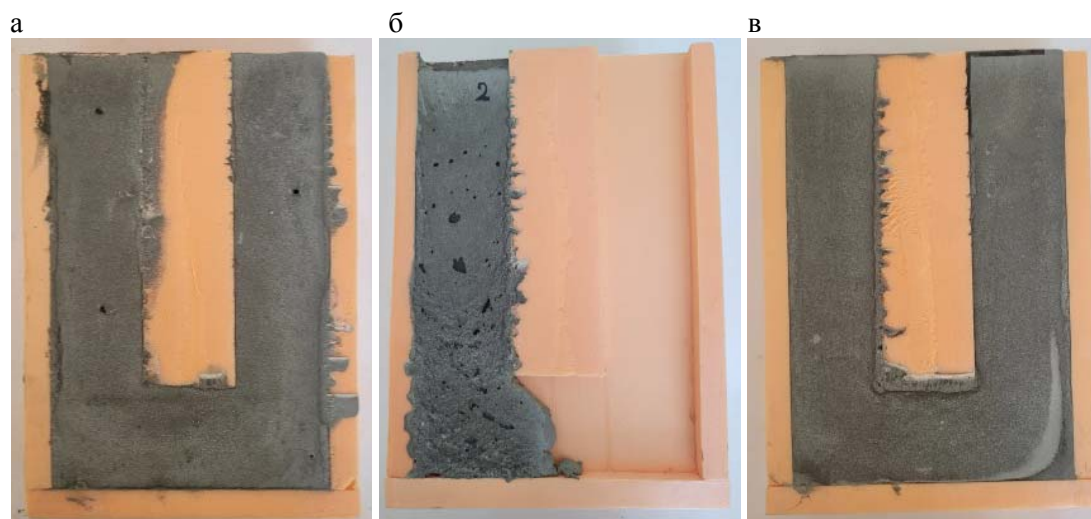


Рис. 5. Полученные образцы бетона:

а – с фиброй «Крепыш»; б – с фиброй CemFibra R; в – с ДМКЦ

Бетонная смесь состава 3, с базальтовой фиброй CemFibra R (рис. 5, б), полностью заполнила форму, а бетонный образец имеет гладкую поверхность, однако наблюдается большое количество крупных пор, что свидетельствует о недостаточной способности смеси к самоуплотнению в части выведения вовлечённого воздуха.

Образец с ДМКЦ с дозировкой 20 % от массы вяжущего (рис. 5, в) имеет гладкую поверхность, у него отсутствуют поры и пустоты, что свидетельствует о хорошей текучести смеси и ее способности к самоуплотнению. Разработанная добавка, микроармирующая цементный камень, достаточно хорошо проявила себя и действительно

не влияет на удобоукладываемость и текучесть самоуплотняющейся бетонной смеси, что является главным условием при получении тонкостенных многопустотных стеновых изделий со сложной конфигурацией методом литья [8, 9, 12].

Для определения прочности бетонных образцов на сжатие были выбраны добавки, показавшие наибольший потенциал при введении их в портландцемент (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Составы на КВс70(ТБ) и их прочностные характеристики

№ п/п	Добавки			Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа		
	ДМЦК-С-12,	ДМЦК-Б-12,	МК, %		5 сут	14 сут	28 сут
1	-	-	-	2463	123	123	162
2	10	-	-	2435	108	115	121
3	20	-	-	2400	98	117	145
4	-	10	-	2486	110	112	122
5	-	20	-	2404	101	104	133
6	-	-	5	2434	120	125	158
7	10	-	5	2455	118	122	160

Стоит отметить, что составы 2 и 4 при введении 10 % добавок ДМЦК-Б-12 и ДМЦК-С-12 имеют одинаковую прочность. Но при увеличении дозировок добавок до 20 % прочность состава 3 с ДМЦК-С-12 возрастает на 16,6 %, а с ДМЦК-Б-12 (состав 5) – на 8,3 %. Эффективность введения 20 % ДМЦК-С-12 на 8,3 % больше, чем 20 % ДМЦК-Б-12.

Более высокие показатели контрольного состава (состав 1) объясняются тем, что разработанная добавка вводится взамен клинкерной составляющей вяжущего, что обеспечивает его ощутимую экономию и снижение выбросов CO<sub>2</sub>. Однако состав 7 с 10 % ДМЦК-С-12 и 5 % МК незначительно уступает в прочности контрольному образцу (на 1,23 %), расход вяжущего при этом снижается на 6,63 % мас., а благодаря введению МК обеспечивается дополнительная сохранность фибры ДМЦК-С-12.

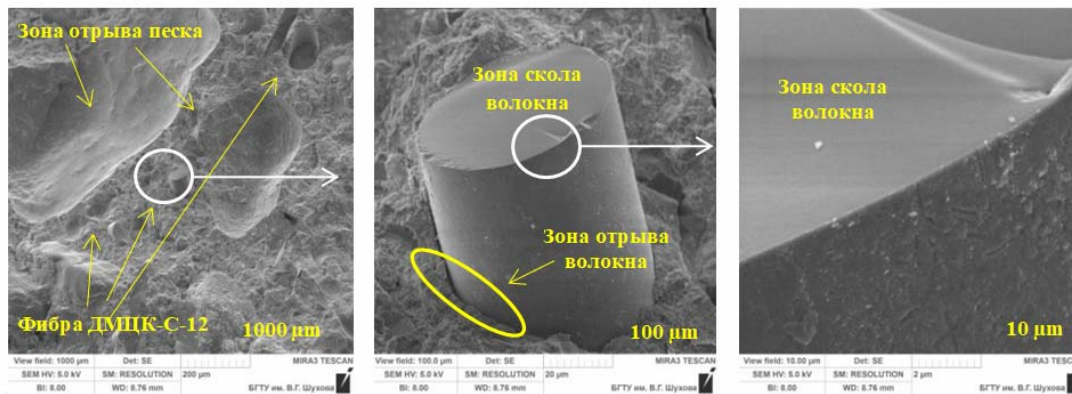
Полученные ранее данные по сохранности волокон в цементном камне подтверждаются микроструктурными исследованиями, выполненными с помощью электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU (Tescan) (рис. 6).

На фотографиях (см. рис. 6) видно, что волокна ДМЦК-Б-12 и ДМЦК-С-12 равномерно распределены по всему объему композита, причем дополнительные мероприятия по обеспечению равномерности и однородности их распределения, обычно необходимые при использовании традиционных фиброволокон, не потребовались. Волокна ДМЦК усиливают участки цементного камня между частицами мелкого заполнителя.

После пребывания в цементном камне поверхность волокон сохраняется гладкой, не наблюдается существенных каверн или уменьшения сечения волокон. Небольшие царапины на волокнах, заметные на снимках, вероятно, получены в процессе изготовления добавки при помоле и также могут способствовать обеспечению сцепления. Стоит отметить, что наблюдаемая выраженная зона отрыва волокна от цементного камня может быть следствием пониженной адгезии, что соотносится с меньшей прочностью образцов на ДМЦК-Б на 28-е сутки (рис. 6, а).

Разрушение микроармированного камня происходит как с разрывом волокон, так и с их вырыванием из матрицы. Последний случай, безусловно, является неоптимальным с позиции эффективности передачи напряжений с камня на арматуру, однако некоторое недоиспользование потенциала волокон, ввиду их малой длины, на наш взгляд, компенсируется высокой технологичностью предложенного метода армирования.

а



б

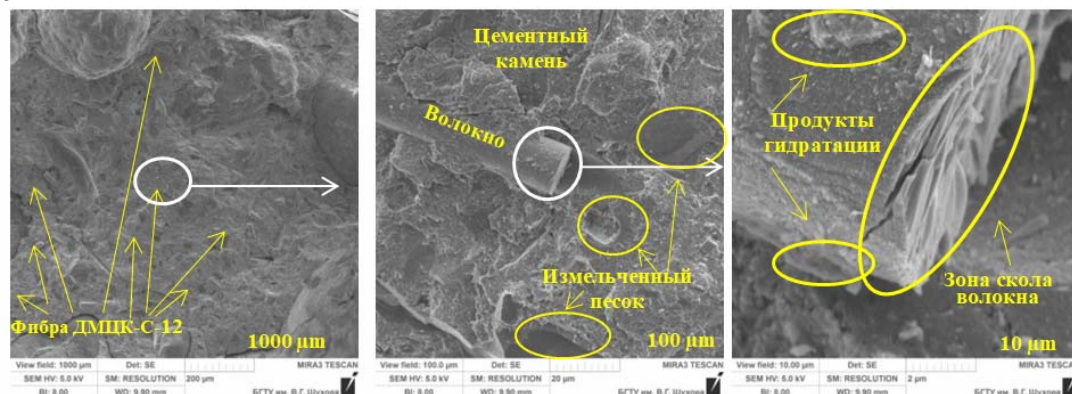


Рис. 6. Микроструктура бетона:

а – с ДМЦК-Б-12 с дозировкой 20 %; б – с ДМЦК-С-12 с дозировкой 20 %

Контактная зона цементного камня и базальтового фиброволокна (рис. 6, а) сформирована несколько хуже, чем у составов со стекловолокном (рис. 6, б) на поверхности, у которых имеет место налипание цементного камня. Возможная химическая реакция цемента со стеклянной фиброй (микрокоррозия поверхности) положительно влияет на степень адгезии. Этим объясняется разница прочностей между составами 3 и 5 (см. табл. 4) с одинаковой дозировкой (20 %) ДМЦК на основе разных типов фибр. В связи с полученными результатами испытания на хрупкость и воздушную усадку проводили с добавкой ДМЦК-С-12 ввиду её наибольшей перспективности.

При проектировании высокопрочных изделий особое внимание следует уделять уменьшению хрупкости разрушения, так как при повышении прочности происходит снижение пластично-деформационных свойств, что приводит к практически мгновенному разрушению при достижении предельного состояния по уровню напряжений. Решением именно данной проблемы является применение фиброволокон, что, в свою очередь, также приводит к повышению трещиностойкости, долговечности, устойчивости к истиранию и снижению усадки бетона.

Было изучено влияние фиброволокон разработанной ДМЦК-С-12 с длиной волокон 0,05-0,44 мм на ударную прочность (хрупкость) бетона (рис. 7). Испытания проводили в возрасте 28 суток на копре Педжа [16]. Показателем сопротивления образца удару служит порядковый номер удара, предшествующего разрушению: чем он выше, тем меньше хрупкость.

Расчет ударной прочности образцов ( $R_{уд}$ , Дж/см<sup>3</sup>) производили по формуле

$$R_{уд} = \frac{mg(1 + 2 + \dots + (n-1))}{V},$$

где  $m$  – масса гири, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $n$  – высота падения груза, вызывающего появление первой трещины на образце, см;  $(n-1)$  – порядковый номер удара, предшествующего разрушению;  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.



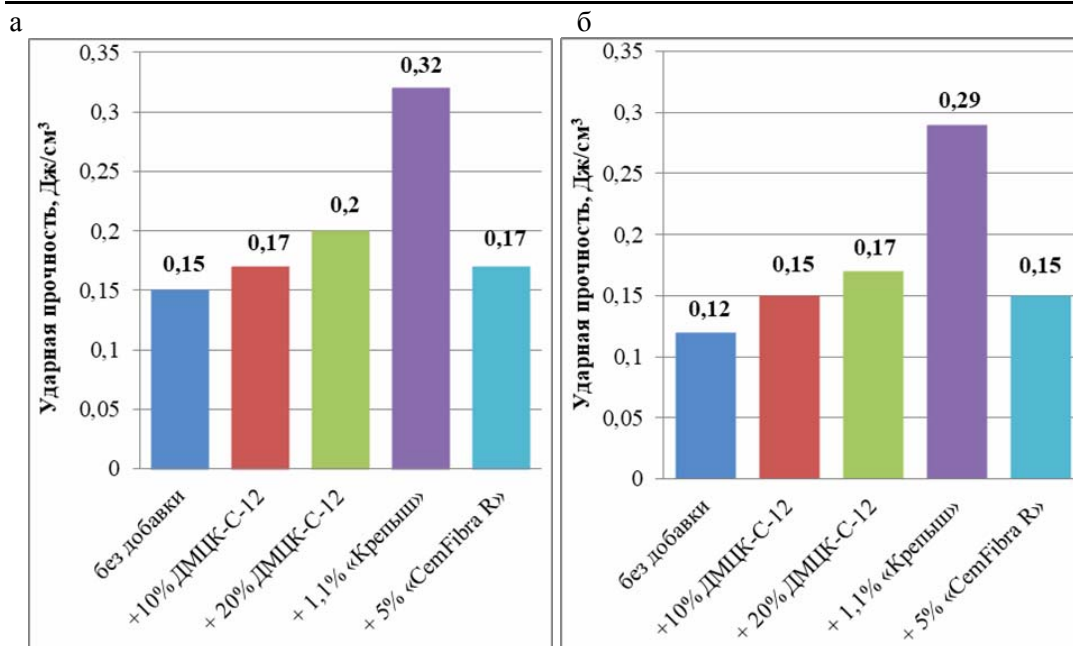


Рис. 7. Зависимость ударной прочности образцов от вида армирующей добавки:  
а – на KBc70(TБ); б – на ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС

Анализ полученных данных (см. рис. 7) показал, что ударная прочность образцов бетона на композиционном вяжущем выше, чем на портландцементе (на 0,02-0,03 Дж/см³), а наибольшую эффективность, как и ожидалось, имеет введение стеклянной фибры «Крепыш» (на 0,17 Дж/см³).

Применение базальтовой фибры «CemFibra R» обеспечивает такую же ударную прочность (0,17 Дж/см³), как у составов на ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС с 20 % ДМЦК-С-12 и на KBc70(TБ) с 10 % ДМЦК-С-12, но менее эффективно, чем использование стеклянной фибры «Крепыш». Для ДМЦК это может быть вызвано значительно меньшей длиной волокон, а для базальтовой фибры «CemFibra R» характерно неравномерное распределение по объему бетонного изделия, чего, в свою очередь, не наблюдается у разработанной ДМЦК.

Введение 10-20 % ДМЦК-С-12 в вяжущее KBc70(TБ) уменьшает хрупкость образцов на 1-2 удара, а ударную прочность увеличивает на 0,02-0,05 Дж/см³ (на 13-33 %) соответственно.

В ходе решения задачи получения тонкостенных стеновых элементов было установлено, что наиболее перспективными являются мелкозернистые бетоны. Их характерной особенностью является структура, обусловленная отсутствием сплошного каменного скелета и повышенной пористостью ввиду увеличенного содержания цементного камня. Из-за отсутствия крупного заполнителя в составе бетонной смеси и малой доли мелкого заполнителя наблюдаются повышенный расход цемента и увеличение деформации усадки бетона. А деформации усадки бетона, в свою очередь, влияют на основные свойства бетона, такие, как прочность и трещиностойкость. В связи с этим были заформованы образцы цилиндрической формы  $l = 23$  см,  $d = 3$  см и определены деформации воздушной усадки и расширения (рис. 8).

Анализируя график (см. рис. 8), можно сказать, что все испытанные составы удовлетворяют нормам по допустимым усадочным деформациям, значения не превышают 0,5 мм/м.

Стоит отметить, что у составов на портландцементе в первые сутки твердения отмечается незначительное расширение бетона, что, вероятно, вызвано химической реакцией при образовании этtringита [17]. Данное явление в составах на портландцементе с введением микрокремнезема и в составах с композиционным вяжущим не отмечается.

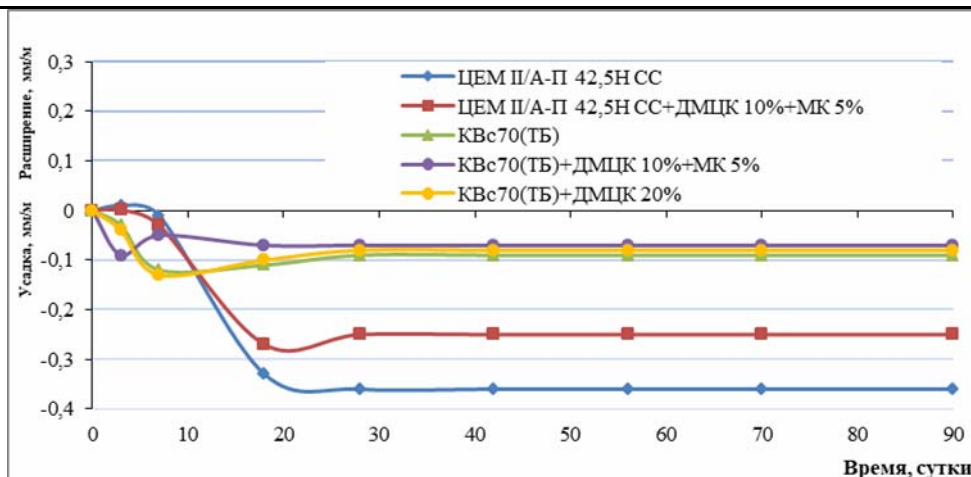


Рис. 8. Деформации усадки мелкозернистых бетонов

У всех составов в возрасте 28...30 суток происходит стабилизация основного объёма величины деформации, что свидетельствует о стабильности вяжущих в воздушно-влажностных условиях.

Составы на КВс70(ТБ) показывают меньшую максимальную величину усадки, без расширения на начальном этапе твердения, что, вероятно, объясняется присутствием в вяжущем минерального наполнителя – тонкомолотого тяжелого бетона. К 28 суткам и в последующие сроки деформации усадки стабилизируются и составляет 0,07-0,09 мм/м. Составы с 20 % ДМЦК имеют примерно такое же значение усадки, как и составы без нее.

Наименьшее значение усадочных деформаций имеют бетонные образцы с вяжущим КВс70(ТБ) и введением добавок – 5 % микрокремнезема и 10 % ДМЦК (0,07 мм/м).

Основываясь на полученных результатах, можно утверждать, что разработанная добавка и предложенный способ микроармирования цементного камня могут как дополнить традиционные способы использования фибр, так и применяться обособленно для смесей с высокой текучестью, предназначенных для получения тонкостенных изделий. Наиболее эффективным, на наш взгляд, форматом продвижения микроармирующих добавок является их включение в состав широкого спектра композиционных вяжущих и сухих строительных смесей. Однако микроармирующая добавка может являться и самостоятельным товарным продуктом, ее сильными сторонами являются лёгкость применения и универсальность.

**Выводы:** 1. Оптимальной по совокупности факторов является добавка ДМЦК-С-12, вводимая в дозировке 10-20 % взамен клинкерной составляющей. Указанное количество добавки включает в себя 1 массовую долю собственно волокна и 2 доли диспергированного в процессе обработки кварцевого песка, за счёт чего происходит уменьшение содержания клинкерной составляющей в смеси.

2. Введение 10-20 % разработанной ДМЦК-С-12 в вяжущее КВс70(ТБ) не несет негативного воздействия на специальные свойства самоуплотняющейся бетонной смеси – не снижает ее текучесть, позволяя получать тонкостенные многоступенчатые стеновые изделия со сложным внутренним строением. Ее применение приводит к увеличению прочности изделий на сжатие, уменьшению хрупкости на 1-2 удара, повышению ударной прочности на 13-33 %, уменьшению усадки изделий на 0,01 мм/м.

3. Предложенные добавки, микроармирующие цементный камень, получают дополнительной диспергацией стандартных фибр, они позволяют обеспечить армирование пространства между частицами мелкого заполнителя самоуплотняющегося бетона, сократить долю клинкерной составляющей без снижения прочности. Микроармирующие добавки полностью совместимы с самоуплотняющимися смесями, могут входить в состав композиционных вяжущих и сухих строительных смесей различного назначения. Применение микроармирующих добавок возможно как в качестве самостоятельного продукта, так и в сочетании с традиционными системами дисперсного и дискретного армирования, в зависимости от особенностей решаемой задачи.

## Список литературы

1. Моргун, В.Н. О структуре фибробетонов / В.Н. Моргун, О.В. Пушенко // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3.
2. Leonovich, S.N. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement / S.N. Leonovich, E.A. Sadovskaya // Science and Technique. – 2022. – Vol. 21, No. 5. – P. 392–396.
3. Ерофеев, В.Т. Повышение эффективности дисперсного армирования в высокопрочных самоуплотняющихся и каркасных бетонах / В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов, С.В. Ананьев, В.В. Леснов, И.В. Ерофеева, Я.А. Санягина, Н.С. Сидоров, Ю.С. Ананьева // Строительные материалы. – 2024. – № 3. – С. 15–24.
4. Кривицкий, П.В. Модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов с продольным и поперечным армированием / П.В. Кривицкий, А.А. Невдах, И.В. Ткачук, Е.В. Шелест // Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture. – 2024. – № 1 (133). – P. 41–47.
5. Нажуев, М.П. Влияние рецептурных факторов на прочностные характеристики базальтофибробетонов / М.П. Нажуев, М.С. Самофалова, Д.М. Ельшаева, Ю.В. Жеребцов, Н.А. Доценко, Н.С. Курбанов, И.И. Ефимов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 7. – С. 24–32.
6. Матниязов, Б.И. Тонкостенные гнутоформованные конструкции с дисперсным армированием для быстровозводимых зданий / Б.И. Матниязов, Б.Ф. Ботиров, Н.Ш. Ботирова // CAJMRMS. – 2024. – № 1.
7. Петухова, Н.А. Оценка стабильности процесса производства строительной продукции / Н.А. Петухова, Я.А. Гречишкина // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 5. – С. 118–123.
8. Elistratkin, M. Hollow Concrete Block Based on High-Strength Concrete as a Tool for Reducing the Carbon Footprint in Construction / M. Elistratkin, A. Salnikova, N. Alfimova, N. Kozhukhova, E. Pospelova // Compos. Sci. – 2024. – 8. – 358.
9. Lesovik, V.S. Construction composites for Lego-blocks production / V.S. Lesovik, M.Yu. Elistratkin, A.S. Salnikova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – 2696, 020006.
10. Казанцев, А.В. Влияние фибрового армирования на свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона / А.В. Казанцев, Е.Н. Николаева // Молодой ученый. – 2018. – № 17(203). – С. 56–58.
11. Ваучский, М.Н. Дисперсная модификация самоуплотняющихся бетонных смесей / М.Н. Ваучский // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № S10(11). – С. 88–92.
12. Лесовик, В.С. Высокопрочные бетоны для лего-блоков / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, А.С. Сальникова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 5. – С. 8–18.
13. Приль, Н.И. Методика испытания самоуплотняющегося бетона в Европе и Российской Федерации / Н.И. Приль // Молодой ученый. – 2021. – № 22(364). – С. 158–159.
14. Сивальнева, М.Н. Реология вяжущих систем различного типа твердения при дисперсном армировании / М.Н. Сивальнева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 12. – С. 18–27.
15. Рахимбаев, Ш.М. Влияние электроповерхностных свойств заполнителей и их пористости на разжижающую способность добавок пластифицирующего действия / Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина, Е.Н. Хахалева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 27–31.
16. Старчуков, Д.С. Повышение ударной прочности высокопрочного бетона, модифицированного зольсодержащими растворами / Д.С. Старчуков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2019. – № 5–6(244–245). – С. 14–16.
17. Харченко, А.И. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих / А.И. Харченко, В.А. Алексеев, И.Я. Харченко, Д.А. Баженов // Вестник МГСУ. – 2019. – № 3 (125).

## References

1. Morgun, V.N. On the structure of fiber concrete / V.N. Morgun, O.V. Pushchenko // Engineering Bulletin of the Don. – 2012. – № 3.
2. Leonovich, S.N. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement / S.N. Leonovich, E.A. Sadvinskaya // Science and Technique. – 2022. – Vol. 21, No. 5. – P. 392–396.
3. Erofeev, V.T. Improving the efficiency of dispersed reinforcement in high-strength self-sealing and frame concretes / V.T. Erofeev, O.V. Tarakanov, S.V. Ananyev, V.V. Lesnov, I.V. Erofeeva, Ya.A. Sanyagina, N.S. Sidorov, Yu.S. Ananyeva // Building materials. – 2024. – № 3. – P. 15–24.
4. Krivitsky, P.V. Models of shear resistance of beam elements made of lightweight concrete with longitudinal and transverse reinforcement / P.V. Krivitsky, A.A. Nevдах, I.V. Tkachuk, E.V. Shelest // Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture. – 2024. – № 1 (133). – P. 41–47.
5. Nazhnev, M.P. The influence of prescription factors on the strength characteristics of basalt fiber concrete / M.P. Nazhnev, M.S. Samofalova, D.M. Yelshaeva, Yu.V. Zhrebtsov, N.A. Dotsenko, N.S. Kurbanov, I.I. Efimov // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2021. – № 7. – P. 24–32.
6. Matniyazov, B.I. Thin-walled bent-shaped structures with dispersed reinforcement for prefabricated buildings / B.I. Matniyazov, B.F. Botirov, N.S. Botirova // CAJMRMS. – 2024. – № 1.
7. Petukhova, N.A. Assessment of the stability of the production process of construction products / N.A. Petukhova, Ya.A. Grechishkina // Modern science-intensive technologies. – 2018. – № 5. – P. 118–123.
8. Elistratkin, M. Hollow Concrete Block Based on High-Strength Concrete as a Tool for Reducing the Carbon Footprint in Construction / M. Elistratkin, A. Salnikova, N. Alfimova, N. Kozhukhova, E. Pospelova // Compos. Sci. – 2024. – 8. – 358.
9. Lesovik, V.S. Construction composites for Lego-blocks production / V.S. Lesovik, M.Yu. Elistratkin, A.S. Salnikova // AIP Conference Proceedings. – 2022. – 2696, 020006.
10. Kazantsev, A.V. Influence of fiber reinforcement on the properties of self-compacting concrete mixture and concrete / A.V. Kazantsev, E.N. Nikolaeva // Young scientist. – 2018. – № 17 (203). – P. 56–58.
11. Vauchsky, M.N. Dispersed modification of self-compacting concrete mixtures / M.N. Vauchsky // Actual problems of military scientific research. – 2020. – № S10 (11). – P. 88–92.
12. Lesovik, V.S. High-strength concrete for Lego blocks / V.S. Lesovik, M.Yu. Elistratkin, A.S. Salnikova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2021. – № 5. – P. 8–18.
13. Pril, N.I. The spread on the Heggermann cone was determined using the method described in the article by / N.I. Pril // Methodology for testing self-compacting concrete in Europe and the Russian Federation Young scientist. – 2021. – № 22(364). – P. 158–159.
14. Sivalneva, M.N. Rheology of binder systems of various types of hardening in dispersed reinforcement / M.N. Sivalneva // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2024. – No. 12. – P. 18–27.
15. Rakhimbaev, Sh.M. Influence of electrosurface properties of fillers and their porosity on the thinning capacity of plasticizing additives / Sh.M. Rakhimbaev, N.M. Tolypina, E.N. Khakhaleva // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – № 12. – P. 27–31.
16. Starchukov, D.S. Increasing the impact strength of high-strength concrete modified with sol-containing solutions / D.S. Starchukov // Construction materials, equipment, technologies of the 21st century. – 2019. – № 5–6(244–245). – P. 14–16.
17. Kharchenko, A.I. Structure and properties of fine-grained concrete based on composite binders / A.I. Kharchenko, V.A. Alekseev, I.Ya. Kharchenko, D.A. Bazhenov // Bulletin of MGSU. – 2019. – № 3 (125).

УДК 691.1

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_73

Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет

Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., 26,  
тел. (499) 183-32-92; факс: (499) 183-44-38

**Степина Ирина Васильевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Строительное  
материаловедение»  
E-mail: sudekina@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering  
(National Research University)

Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe sh.,  
tel. (499) 183-32-92; fax: (499) 183-44-38

**Stepina Irina Vasilievna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
«Construction Materials Science»  
E-mail: sudekina@mail.ru

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета  
«ПРИОРИТЕТ-2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые  
технологии, новые материалы, новые методы».

## «ЗЕЛЕННЫЕ» СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

И.В. Степина

Приведен анализ «зеленых» строительных материалов на основе лигноцеллюлозного сырья (ЛЦСМ) как ключевого элемента устойчивого экостроительства. Рассмотрены принципы «зеленого» строительства, направленные на минимизацию экологического воздействия, снижение энергопотребления и выбросов CO<sub>2</sub>. Представлена классификация экологических материалов, включая переработанные, энергоэффективные, низкоуглеродные, инновационные биоматериалы и возобновляемые природные ресурсы. Особое внимание уделено ЛЦСМ: древесным композитам (CLT, ДПК), материалам из соломы, конопля (гемпкрит), льна, бамбука и др. Подчеркнуты их преимущества (низкий углеродный след, энергоэффективность, биоразлагаемость, улучшение микроклимата) и ограничения (водостойкость, стандартизация, стоимость). Обоснована перспективность ЛЦСМ для снижения экологической нагрузки и перехода к ресурсосберегающему строительству.

*Ключевые слова:* «зеленое» строительство, экологичные материалы, лигноцеллюлозное сырье, возобновляемые ресурсы, низкий углеродный след, энергоэффективность, древесные композиты, гемпкрит, соломенные панели, бамбуковые конструкции, биоматериалы, переработка отходов

## GREEN BUILDING MATERIALS BASED ON LIGNOCELLULOSIC RAW MATERIALS

I.V. Stepina

The article analyzes green building materials based on lignocellulosic raw materials (LCBM) as a key element of sustainable eco-construction. The principles of «green» construction aimed at minimizing environmental impact, reducing energy consumption, and lowering CO<sub>2</sub> emissions are examined. A classification of eco-friendly materials is presented, including recycled, energy-efficient, low-carbon, innovative biomaterials, and renewable natural resources. Particular attention is paid to LCBM: timber composites (CLT, WPC), materials made from straw, hemp (hempcrete), flax, bamboo, and others. Their advantages (low carbon footprint, energy efficiency, biodegradability, improved indoor climate) and limitations (water resistance, standardization, cost) are highlighted. The article substantiates the potential of LCBM for reducing environmental impact and transitioning to resource-efficient construction.

*Keywords:* green construction, eco-friendly materials, lignocellulosic raw materials, renewable resources, low carbon footprint, energy efficiency, timber composites, hempcrete, straw panels, bamboo structures, biomaterials, waste recycling

«Зеленое» строительство (экостроительство, устойчивое строительство) – это подход к проектированию, возведению и эксплуатации зданий, направленный на минимизацию воздействия на окружающую среду и оптимизацию ресурсопотребления на всех этапах жизненного цикла объекта [1]. Основными целями при этом являются: снижение потребления энергии и воды (до 30–50 % по сравнению с традиционными технологиями); улучшение качества внутренней среды (воздух, освещение, акустика) для здоровья людей; сокращение отходов и выбросов CO<sub>2</sub> (например, на 25 % для энергопотребления); сохранение экосистем через рациональное использование земельных ресурсов и биоразнообразия. Концепция устойчивого развития, рассматриваемая на уровне государств, часто связана с проблемами мирового масштаба, такими, как глобальное потепление или постепенное истощение ресурсов. Эти два критерия представляют собой точки невозврата для нашей цивилизации. В связи с чем сохранение окружающей среды является одной из основных характеристик устойчивого развития [1].

«Зеленые» (экологичные) строительные материалы – это материалы, при производстве, использовании и утилизации которых минимизируется негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [2]. Их ключевыми особенностями являются: возобновляемость, перерабатываемость, низкий углеродный след, энергоэффективность, безопасность и долговечность. «Зеленые» строительные материалы характеризуются следующими преимуществами [2]:

- снижение воздействия на окружающую среду: меньше выбросов CO<sub>2</sub>, меньше добычи первичных ресурсов, меньше отходов на свалках;
- энергоэффективность: лучшая изоляция и, как следствие, меньше затрат энергии на отопление/охлаждение;
- здоровье и комфорт: улучшенное качество воздуха в помещении (меньше токсичных испарений), естественная регуляция влажности («дышащие» материалы);
- долговечность и низкие эксплуатационные расходы: многие экоматериалы являются более долговечными и требуют меньшего ухода;
- возобновляемость и устойчивость: использование ресурсов, которые можно воспроизводить;
- инновации и эстетика: современные решения и естественная красота природных материалов.

Все многообразие «зеленых» строительных материалов условно можно разделить на пять основных категорий (рис. 1), которые, безусловно, взаимодополняемы и пересекаемы как по виду материалов, так и по вкладу в минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. При этом необходимо отметить, что во всех категориях значительную долю занимают строительные материалы на основе лигно-целлюлозного сырья (ЛЦСМ) – это материалы на основе древесного и недревесного сырья растительного происхождения.

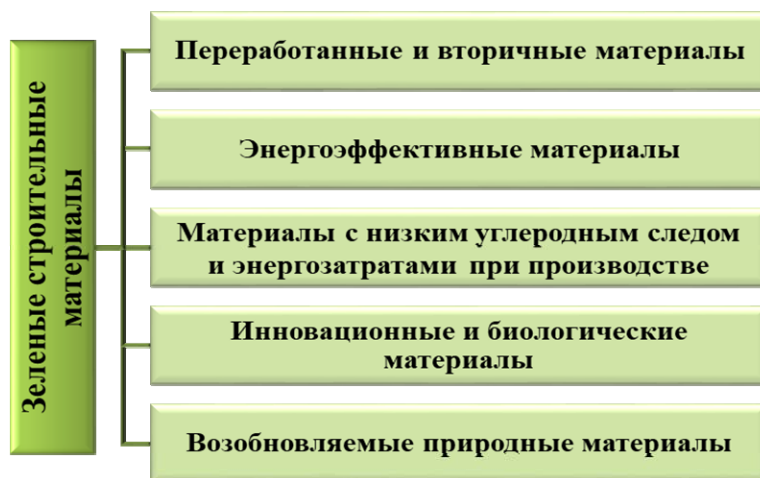


Рис. 1. Классификация «зеленых» строительных материалов

**Переработанные и вторичные материалы.** Например, переработанный бетон и кирпич [3]: бой бетона и кирпича дробят и используют как заполнитель для нового бетона («бетонный щебень»), дорожных оснований, отсыпок. Это сокращает потребность в добыче природного щебня и вывозе отходов на свалки. Переработанное стекло: стеклобой используют для производства стекловаты (утеплитель), стеклянной плитки, добавок в бетон и асфальт, декоративных элементов [4]. Переработанный пластик: из пластиковых отходов делают композитные пиломатериалы (террасные доски с заполнителем на основе лигноцеллюлозного сырья), изоляционные материалы на основе лигноцеллюлозного сырья, тротуарную плитку, ковровые покрытия. Таким образом решается проблема утилизации пластикового мусора [5]. Переработанный металл (сталь, алюминий) – металлолом, который переплавляется с огромной экономией энергии (до 95 % для алюминия) по сравнению с производством первичного металла и используется для производства прочных и долговечных металлических изделий различного назначения [6].

**Энергоэффективные материалы** представлены высокоэффективной изоляцией. К этой группе относятся: целлюлозная вата из переработанной макулатуры, обладающая высокими изоляционными свойствами [7]; минеральная вата (каменная/стеклянная), которая часто содержит значительный процент вторичного сырья, являясь негорючим материалом с высокими звукоизолирующими свойствами [8]; пробковые плиты – натуральный изолятор; древесноволокнистые плиты из отходов деревообработки, «дышащие», с хорошими теплоизоляционными и звукопоглощающими свойствами [9].

Помимо вышеперечисленных материалов, представляющих собой композиты из различных по составу, преимущественно волокнистых компонентов как природного, так и техногенного (отходы промышленности) генезиса, к энергоэффективным относятся, например, различные классы ячеистых строительных материалов, энергосберегающее остекление из многокамерных стеклопакетов и стекла с низкоэмиссионным покрытием (Low-E), заполненные инертным газом (аргон, криптон), значительно снижающие теплопотери зимой и перегрев летом и т.д.

**Материалы с низким углеродным следом и энергозатратами** при производстве. К ним относятся глиняные материалы (саман, глинобитные блоки, сырцовый кирпич), которые производятся из глины, песка, соломы/опилок. Такие материалы часто не требуют обжига (сушатся на солнце, тем самым не участвуют во вкладе в повышение углеродного следа), являются «дышащими», способны регулировать влажность. Натуральные штукатурки и краски на основе глины, мела, растительных масел, минеральных пигментов, которые не содержат токсичных летучих органических соединений и безопасны для здоровья. Лигноцеллюлозные строительные материалы (древесина, композиционные материалы на основе древесного и недревесного растительного сырья) также относятся к группе материалов с низкими углеродным следом и энергозатратами [10].

**К инновационным и биологическим материалам** относятся мицелиальные композиты, «выращенные» на основе грибного мицелия и растительных отходов (шелуха, опилки). Как правило, это легкие, биоразлагаемые материалы, являющиеся хорошими изоляторами. Такие материалы используются для упаковки, изготовления акустических панелей, элементов мебели. Примером и демонстрацией таких материалов является органическая грибовидно-кирпичная башня высотой 12 м. Построена из биоразлагаемых кирпичей, состоящих из сельскохозяйственных отходов и грибной культуры, представляет собой арт-объект и демонстрирует актуальность и перспективность производства и применения такого вида «зеленых» материалов в строительстве как материалов будущего. Кирпичи, из которых построена башня, выращены за 5 дней [11].

К инновационным биоматериалам относятся биопластики на основе растительного сырья (кукурузный крахмал, целлюлоза), которые могут быть биоразлагаемыми или компостируемыми [12].

Еще одной из разновидностей материалов, относящихся к данной категории, являются «зеленые» кровли и стены – это живые растения на крышах и фасадах,



которые позволяют улучшить изоляцию, управлять ливневыми стоками, создают благоприятную среду обитания, очищают воздух, улучшают видеоэкологическую обстановку и охлаждают города.



Рис. 2. Ну-Фи ТOWER у центра искусств в Нью-Йорке.  
Фото © Cecil Barnes V/ archdaily.com

**Возобновляемые природные материалы** занимают первое место среди «зеленых» строительных материалов, поскольку в наибольшей степени соответствуют целям «зеленого» строительства. К таковым относятся строительные материалы на основе лигноцеллюлозного (растительного) сырья, часто называемые биокompозитами или природными композитами. Среди них традиционные материалы – древесина и древесные композиты, клееный брус (Glulam) и перекрестно-клееная древесина (CLT – Cross-Laminated Timber), позволяющие строить многоэтажные здания [13].

Древесностружечные плиты (ДСП, OSB – ориентированно-стружечная плита) изготавливаются из древесной щепы/стружки и связующих (часто формальдегидных, но разработаны экологичные альтернативы на основе лигнина или сои). Древесноволокнистые плиты (ДВП, MDF (Medium Density Fibreboard – древесноволокнистая плита средней плотности ( $600\text{--}850\text{ кг/м}^3$ ), HDF (High Density Fibreboard – древесноволокнистая плита высокой плотности ( $850\text{--}1000\text{ кг/м}^3$ ))) производят из древесных волокон: например, мягкие ДВП (для изоляции) и твердые (для мебели, отделки) [13].

Древесно-полимерные композиты (ДПК/WPC (Wood-Plastic Composite)), представляющие собой смесь древесной муки/волокон с пластиком (часто переработанным ПЭТ, ПЭ, ПП), используются для изготовления террасной доски, ограждений, отделки, устойчивы к гниению [14].

В статье [2] описан процесс создания прозрачной древесины (рис. 3). Этот процесс включает в себя удаление лигнина, содержащегося в стенках клеток, что позволяет



сделать древесину «красиво белой» (как это описывают исследователи), но не помогает сделать ее прозрачной, поскольку сама древесина задерживает свет. Но внедрив в «белое дерево» прозрачный полимер, известный как преполимеризованный метилметакрилат (ПММА), ученые смогли изменить его коэффициент преломления и добиться пропускания света до 85 %, сохранив при этом привычную структуру дерева. Такая прозрачная древесина в перспективе, по мнению авторов, может заменить оконное стекло, сделав его более дешевым. Кроме того, такие окна могут пропускать свет внутрь и, в зависимости от уровня светопропускания, обеспечивать приватность для жильцов.



Рис. 3. Образец прозрачной древесины [2]

Материалы на основе недревесного растительного сырья, например рисовой, пшеничной, ржаной соломы в виде тюков, которая используется как заполнитель стенового каркаса или как несущие элементы, обладают отличными теплоизоляционными свойствами. Соломенные панели представляют собой прессованную солому, облицованную картоном, ДВП или цементными плитами для удобства монтажа и повышения огнестойкости [13].

Материал гемпкрит (Hempcrete) – это смесь конопляной костры (сердцевины стебля), извести (как связующее) и воды. Такой аморфный материал, используемый для заполнения каркаса, изоляции, внутренних перегородок, обладает исключительными свойствами: отличная тепло- и звукоизоляция; высокая паропроницаемость (дышащий материал); регулируемая влажность в помещении; огнестойкость и устойчивость к вредителям; отрицательный углеродный след (конопля поглощает много  $\text{CO}_2$  в процессе роста, а известь в процессе эксплуатации карбонизируется) [13].

Льняные плиты/маты из коротких льняных волокон (костры) со связующим (часто крахмал) используются для тепло- и звукоизоляции стен, крыш, перекрытий. Такие материалы отличаются хорошими экологическими показателями, паропроницаемы, устойчивы к грызунам [13].

Пробковые плиты/гранулы из коры пробкового дуба являются отличными тепло- и звукоизоляционными материалами, обладают упругими свойствами, водо-, био- и огнестойкостью. Используются как изоляция, подложка под полы, декоративные панели [15].

Бамбуковые стебли/балки применяются как конструкционный материал (леса, каркасы, кровля) в регионах произрастания. Прочность на растяжение у таких видов материалов сравнима со сталью. Бамбуковые композиты – склеенные под давлением

полосы бамбука (аналогично клееному брусу или фанере) (Bamboo Glulam, Bamboo Plywood, Bamboo Scrimber) – обладают высокой плотностью, применяются для конструкций, отделки, напольных покрытий, мебели [13].

Камышовые/тростниковые маты используются для кровли (традиционная тростниковая крыша), как звукоизоляция под штукатурку, для временных конструкций [13].

Джут, сизаль, кенаф, кокосовое волокно (койр) используются в виде матов, плит или в качестве армирующих добавок в композиты (например, с биополимерами или минеральными вяжущими) для изоляции, подложек, легких панелей [13].

С учетом того что растительное сырье относится к быстровозобновляемым материалам, технологии производства строительных материалов на их основе выходят на уровень высоковостребованных и перспективных с позиций «зеленого» низкоуглеродного строительства. Ключевыми преимуществами возобновляемых природных материалов являются следующие показатели:

- источники сырья восстанавливаются за относительно короткий срок;
- низкий углеродный след – поглощение CO<sub>2</sub> при росте растений, меньшая энергоемкость производства по сравнению с бетоном, сталью, пластиками. При этом некоторые материалы (гемпкрит) имеют отрицательный углеродный след;
- биоразлагаемость/компостируемость – многие материалы (особенно с натуральными связующими) могут безопасно возвращаться в природу;
- энергоэффективность – высокие теплоизоляционные свойства (солома, конопля, лен, пробка) снижают потребность в отоплении/охлаждении;
- здоровый микроклимат – паропроницаемость («дышащие» стены) способствует регуляции влажности в помещении, снижается риск образования плесени;
- хорошая звукоизоляция;
- утилизация отходов сельского хозяйства – использование соломы, льняной костры, конопляной костры, рисовой шелухи и т.д.

Однако необходимо отметить и существующие ограничения на использование возобновляемых природных материалов в строительстве:

- низкая водостойкость – требуется модифицирование и/или создание правильных конструктивных решений для защиты от влаги;
- огнестойкость – многие материалы (особенно плотные – гемпкрит, соломенные тюки в оштукатуренной стене) обладают хорошей огнестойкостью, но сложившиеся стереотипы часто выступают барьером к их использованию;
- стандартизация и сертификация – не все материалы имеют долгую историю применения и развитые стандарты (особенно новые композиты);
- стоимость и доступность – могут быть дороже традиционных материалов из-за меньших масштабов производства и логистики. Кроме того, доступность сырья зависит от региона.

**Заключение.** Строительные материалы на основе растительного сырья – это не возврат в прошлое, а современные, технологичные решения для устойчивого «зеленого» строительства. Они сочетают экологические преимущества с высокими эксплуатационными характеристиками, особенно в области теплоизоляции и создания здоровой среды обитания. По мере развития технологий, стандартизации и увеличения масштабов производства их роль в строительстве будет только расти.

Концепция устойчивого развития, как правило, связана с проблемами мирового масштаба, такими, как глобальное потепление или постепенное истощение ресурсов. Эти два критерия представляют собой точки невозврата для нашей цивилизации. Сохранение окружающей среды является одной из основных характеристик устойчивого развития и главным фактором, способствующим быстрому распространению «зеленых» строительных материалов на основе лигноцеллюлозного сырья, воздействие которых на окружающую среду весьма ограничено и даже может быть положительным.

При внедрении принципов «зеленого» строительства в современные строительные технологии необходимо помнить о так называемом «зеленом камуфляже»

(greenwashing) – не все материалы, позиционируемые как «экологичные», являются таковыми. Особое внимание следует обращать на сертификаты (LEED, BREEAM, Cradle to Cradle, ЭКО) и анализировать полный жизненный цикл как самого материала, так и объекта, в состав которого, как правило, входят материалы разной природы (состава), структуры и, как следствие, разного срока эксплуатации. Кроме того, «зеленые» материалы могут быть дороже традиционных на этапе покупки, но часто окупаются за счет долговечности, экономии энергии и экологичности. Рациональное использование принципа локальности – применение местных материалов резко снижает их стоимость и транспортный углеродный след.

### Список литературы

1. Zuo, J. Green building research—current status and future agenda : A review / J. Zuo, Z.Y. Zhao. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021> // Renewable and sustainable energy reviews. – 2014. – Vol. 30. – P. 271–281.
2. De Luca, P. Green building materials: A review of state of the art studies of innovative materials / P. De Luca, I. Carbone, J.B. Nagy. – DOI: <https://doi.org/10.3992/1943-4618.12.4.141> // Journal of Green Building. – 2017. – Vol. 12, No 4. – P. 141–161.
3. Likes, L. Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete / L. Likes [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651> // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 364. – P. 132651.
4. Robert, D. A new technology of transforming recycled glass waste to construction components / D. Robert, E. Baez, S. Setunge. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125539> // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 313. – P. 125539.
5. Еговцев, К.Ю. Строительство автомобильных дорог с применением переработанного пластика / К.Ю. Еговцев, И.Л. Бартоломей // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2019. – С. 69–73.
6. Колесников, А.Г. Использование переработанных гальванических шламов как одна из рециклинговых технологий / А.Г. Колесников, А.А. Белкин. – DOI: <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-25-1-54-62> // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2019. – №. 1. – С. 54–62.
7. Ефимова, Т.В. Способы утилизации и переработки упаковочного материала Tetra Pak / Т.В. Ефимова, Т.С. Амарова, Е.В. Украинская // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – Т. 7, №. 3. – С. 52–56.
8. Alpackiy, D. Recycling in the production of mineral wool / D. Alpackiy // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2023. – Vol. 383. – P. 04086.
9. Сафин, Р.Г. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов / Р.Г. Сафин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №. 20. – С. 123–128.
10. Рахимов, Р.З. К развитию и расширению глинобитного строительства / Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова. – DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-170-175> // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – №. 1. – С. 170–175.
11. Attias, N. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis / N. Attias [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037> // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 246. – P. 119037.
12. Лешина, А. Пластики биологического происхождения / А. Лешина // Химия и жизнь. – 2012. – №. 9. – С. 1.
13. Пичугин, А.П. Строительные материалы из растительного сырья : монография / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, О.Е. Смирнова ; Новосиб. гос. Аграрный ун-т. – Новосибирск : НГАУ, 2020. – 207 с.
14. Ильина, В.В. Фотополимерные материалы в практике реставрационно-консервационных работ на объектах историко-культурной ценности / В.В. Ильина, В.В. Строкова. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-76-83> // Строительные материалы. – 2023. – № 12. – С. 76–83.

15. Данилов, В.Е. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции / В.Е. Данилов, А.М. Айзенштадт. – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.111/> Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 2(368). – С. 111–118.

## References

1. Zuo, J. Green building research—current status and future agenda : A review / J. Zuo, Z.Y. Zhao. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021> // Renewable and sustainable energy reviews. – 2014. – Vol. 30. – P. 271–281.
2. De Luca, P. Green building materials: A review of state of the art studies of innovative materials / P. De Luca, I. Carbone, J.B. Nagy. – DOI: <https://doi.org/10.3992/1943-4618.12.4.141/> Journal of Green Building. – 2017. – Vol. 12, No 4. – P. 141–161.
3. Likes, L. Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete / L. Likes [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651> // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 364. – P. 132651.
4. Robert, D. A new technology of transforming recycled glass waste to construction components / D. Robert, E. Baez, S. Setunge. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125539> // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 313. – P. 125539.
5. Egovtsev, K.Yu. Construction of roads using recycled plastic / K.Yu. Egovtsev, I.L. Bartolomei // Chemistry. Ecology. Urbanism. – 2019. – Vol. 2019. – P. 69–73.
6. Kolesnikov, A.G. Use of recycled galvanic sludge as one of the recycling technologies / A.G. Kolesnikov, A.A. Belkin. – DOI: <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-25-1-54-62> // Biosphere compatibility: man, region, technology. – 2019. – No. 1. – P. 54–62.
7. Efimova T.V., Amarova T.S., Ukrainskaya E.V. Methods of utilization and recycling of Tetra Pak packaging material / T.V. Efimova, T.S. Amarova, E.V. Ukrainskaya // Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice. – 2019. – Vol. 7. – No. 3. – P. 52–56.
8. Alpackiy, D. Recycling in the production of mineral wool / D. Alpackiy // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2023. – Vol. 383. – P. 04086.
9. Safin, R.G. Modern building composite materials based on wood waste / Safin R.G. [et al.] // Bulletin of Kazan Technological University. – 2014. – Vol. 17, No. 20. – P. 123–128.
10. Rakhimov, R.Z. Towards the development and expansion of adobe construction / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova. – DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-170-175> // Academia. Architecture and Construction. – 2021. – No. 1. – P. 170–175.
11. Attias, N. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis / N. Attias [et al.]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037> // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 246. – P. 119037.
12. Leshina, A. Plastics of biological origin / A. Leshina // Chemistry and Life. – 2012. – No. 9. – P. 1.
13. Pichugin, A.P. Construction materials from plant raw materials : monograph / A.P. Pichugin, V.F. Khritankov, O.E. Smirnova ; Novosib. state Agrarian University. – Novosibirsk : NGAU, 2020. – 207p.
14. Ilyina, V.V. Photopolymer materials in the practice of restoration and conservation works at sites of historical and cultural value / V.V. Ilyina, V.V. Strokova. – DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-76-83> // Building materials. – 2023. – No. 12. – P. 76–83.
15. Danilov, V.E. Use of modified Scots pine bark as backfill heat and sound insulation / V.E. Danilov, A.M. Aizenshtadt. – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.111/> // News of Higher Education Institutions. Forestry Journal. – 2019. – No. 2 (368). – P. 111–118.

УДК 691.175:69.059:624.21

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_81

*Приволжский государственный  
университет путей сообщения**Volga State Transport University*

Россия, 443066, Самара, уд. Свободы, д. 2В

Russia, 443066, Samara, 2V, Svoboda St.

**Баранов Александр Сергеевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Железнодорожный путь  
и строительство»**Baranov Aleksandr Sergeevich**,  
Candidate of Sciences in Technology,  
Associate Professor of the Department  
«Railway Track and Construction»

E-mail: a.baranov@samgups.ru

E-mail: a.baranov@samgups.ru

**Зюзин Данила Олегович**,  
аспирант 1 года обучения по научной  
специальности 2.1.5 «Строительные  
материалы и изделия»**Zyuzin Danila Olegovich**,  
1st year postgraduate student in the scientific  
specialty 2.1.5 «Building materials and  
products»

E-mail: d.zyuzin@samgups.ru

E-mail: d.zyuzin@samgups.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ

А.С. Баранов, Д.О. Зюзин

Представлены инновационные композитные материалы с различным наполнением. В современных условиях эксплуатации мостовых сооружений железобетонные изделия и конструкции подвержены различным нагрузкам и воздействиям внешних факторов, что может привести к деградации их поверхности и снижению несущей способности в целом. Цель исследования состоит в поиске перспективного и эффективного композитного материала путем сравнения механических свойств материалов с различным наполнением. Это позволит определить дальнейшие перспективы внешнего армирования существующих железобетонных несущих конструкций. Экспериментальная часть исследования включает в себя испытания специальных опытных образцов на осевое растяжение. Сделан вывод относительно подбора режима 3D-печати для достижения оптимальных механических характеристик материала в соответствии с требуемыми условиями.

*Ключевые слова: композитные материалы, напряжения, деформации, растяжение, прочность на разрыв, предел текучести, 3D-печать*

## EXPERIMENTAL STUDY OF COMPOSITE MATERIALS FOR STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE SPAN STRUCTURES

A.S. Baranov, D.O. Zyuzin

The article presents innovative composite materials with different fillings. In modern conditions of bridge structures operation reinforced concrete products and structures are subjected to various loads and external factors, which can lead to degradation of their surface and a decrease in the bearing capacity as a whole. The purpose of the study is to find a promising and most effective composite material by comparing the mechanical properties of materials with different fillings. This allows us to determine the future prospects for external reinforcement of existing reinforced concrete load-bearing structures. The experimental part of the study includes testing special prototypes for axial tension. In addition, a conclusion is made regarding the selection of the 3D printing mode to achieve optimal mechanical characteristics of the material in accordance with the required conditions.

*Keywords: composite materials, stresses, deformations, tension, tensile strength, yield strength, 3D-printing*

**Введение.** В настоящее время всё больше растёт интенсивность движения и увеличивается объём грузоперевозок. Для обеспечения безопасного движения на

некоторых участках автомобильных и железных дорог требуется проведение восстановительных работ на искусственных сооружениях. Однако множество мостов и путепроводов рассчитаны под меньшую (устаревшую) нагрузку. В целях соответствия действующим нормативным нагрузкам возросла потребность в усилении несущих конструкций искусственных сооружений. Одним из наиболее эффективных методов усиления на данный момент является внешнее армирование.

На замену традиционным материалам, используемым при таком методе усиления, приходят композитные материалы. Развитие современных технологий открыло новые горизонты в области материаловедения. Композитные материалы имеют ряд преимуществ перед традиционными, а также огромную вариативность, что позволяет подобрать оптимальный композитный материал в зависимости от конкретных условий. Однако для улучшения характеристик материала требуется изучение его механических свойств, а также характера его работы под нагрузкой.

Композиты – многокомпонентные материалы, в их состав входят пластичная основа (матрица), а также наполнители, которые придают материалу прочность, жесткость и т.д.

Исследование композитных материалов весьма разнообразно. В сочетании с 3D-печатью образцов можно не только исследовать существующие композиты, но и разрабатывать новые материалы с различным заполнением и содержанием примесей [7-9]. Использование различных наполнителей позволяет создать подходящий под специфические условия материал.

**Методика.** Исследования ведутся уже продолжительное время, сам процесс усиления искусственных сооружений [1-5; 10-15] претерпел множественные изменения. Так же, как и процесс, модернизация затронула сами материалы для усиления.

На этапе проектирования системы внешнего армирования одним из ключевых аспектов является выбор материала для усиления. Важно учитывать его механические свойства. На данный момент на рынке материалов представлены как зарубежные, так и отечественные композитные материалы и эпоксидные составы. Одними из таких композитных материалов являются FibAR M Tape 530/300, MB race Fib CF 230/4900.23 0g, CarbonWr ar Tape 530/300 отечественного производства. Прочность на растяжение данных материалов составляет не менее 4900 МПа, что гораздо выше такого же показателя у арматурной стали, привариваемой при внешнем армировании традиционным способом. Такой материал водонепроницаем, устойчив к коррозии, поддается преднапряжению, а также не нарушает целостность усиливаемой конструкции при монтаже. Такие качества очень актуальны в условиях ограниченного пространства, где традиционные методы усиления невозможны и нецелесообразны.

Использование систем внешнего армирования с применением композитных материалов набирает всё большую популярность и становится одним из наиболее эффективных и экономически оправданных решений для усиления пролетных строений. Это не только улучшает эксплуатационные характеристики сооружений, но и обеспечивает возможность приведения их к современным эталонным нагрузкам.

Экспериментальные исследования проводились с целью определения таких механических свойств материала, как прочность на разрыв, предел текучести и относительное удлинение. В качестве предмета для исследования композитных материалов и их свойств были изготовлены опытные образцы из трех композитных пластиков согласно ГОСТ 33693-2015 (рис. 1, 2):

FORMAX – инженерный термопластик на основе ABS с добавлением углеволокна до 15 %, обладающий способностью выдерживать большие нагрузки и высокие температуры. Основными преимуществами являются простота и стабильность при печати, а также повышенная прочность и жесткость;

РА ABS GF-8 состоит из смеси акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) и полиамида (РА6) с добавлением 8 % стекловолокна. Данный материал прекрасно подходит для печати конечных изделий, которым требуются высокая ударопрочность и стойкость к ультрафиолету. Также материал инертен к большинству химических растворителей;

ABS GF-5 – это модификация ABS-пластика с добавлением 5 % стекловолокна, иными словами, композит, армированный рубленым стекловолокном. Обладает улучшенными прочностными свойствами и приятной фактурой финишной поверхности распечатки.

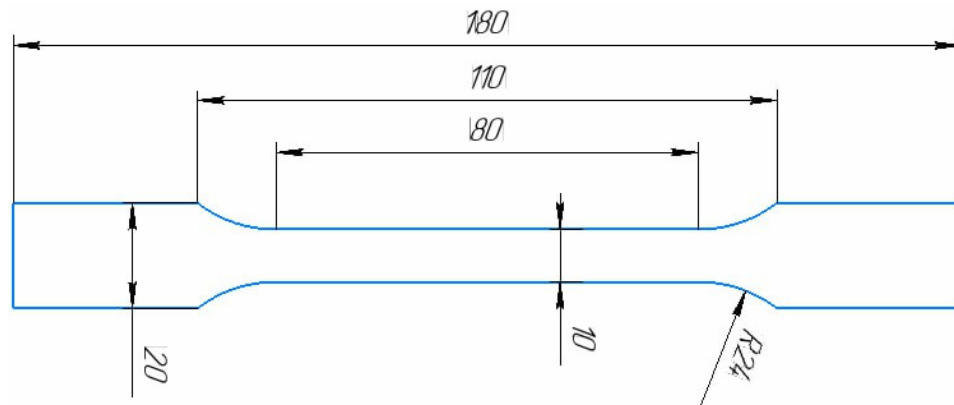


Рис. 1. Вид образца для определения механических свойств при растяжении по ГОСТ 33693 – 2015



Рис. 2. Опытные образцы, изготовленные на 3D-принтере

Для печати образцов использовался 3D-принтер PICASO 3D Designer XL PRO S2 (Series 2). Для расположения образцов на печатном столе 3D-принтера была использована специализированная программа Prusa Slicer. Образцы выращивались в трех направлениях: параллельно печатному столу, горизонтально боком и вертикально (рис. 3). В табл. 1 описана маркировка образцов для удобства их различия.

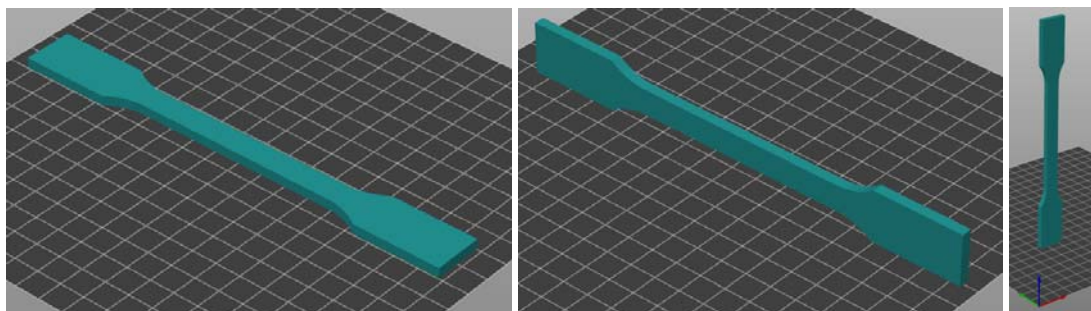


Рис. 3. Варианты расположения образцов на печатном столе в программе



## Маркировки образцов каждой целевой группы

№1-2	Горизонтально параллельно столу
№3-4	Горизонтально «ребром»
№5-6	Вертикально

Для проведения экспериментальных исследований использовалась универсальная испытательная машина TIRA Test 28300, которая обеспечивает точное и контролируемое приложение нагрузки к испытываемому образцу, оснащена высокоточным датчиком нагрузки и системой измерения деформации. Это позволяет проанализировать зависимость между напряжениями и деформацией.

**Экспериментальная часть.** В захваты машины надежно закрепляется образец. В программу проведения испытания заносятся основные параметры и размеры самого образца. Далее настраиваются такие параметры испытания, как скорость проведения испытания, предел нагрузки и область испытания. После полной калибровки и настройки параметров образцы, установленные в гидравлические зажимные устройства, растягиваются до разрушения путем перемещения верхней траверсы, нижняя траверса при этом остаётся неподвижной [8].

Результаты проведения испытаний представлены в виде зависимостей «напряжения – деформации» (рис. 4-6), а также сводной таблицы по материалам (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

## Результаты испытания образцов из композитных материалов

№ маркировки	FORMAX			ABS GF-5			PA ABS GF-8		
	Rm MPa	Rp0,2 MPa	Ag %	Rm MPa	Rp0,2 MPa	Ag %	Rm MPa	Rp0,2 MPa	Ag %
1	45	29	1,07	34	22	1,35	50	26	5,06
2	46	33	1,27	35	24	1,12	49	27	4,68
3	51	33	0,95	43	29	0,88	56	23	3,73
4	51	34	1,20	43	29	1,20	56	29	3,73
5	39	30	0,83	15	13	0,32	31	21	7,80
6	42	26	1,08	15	11	0,41	29	16	7,22

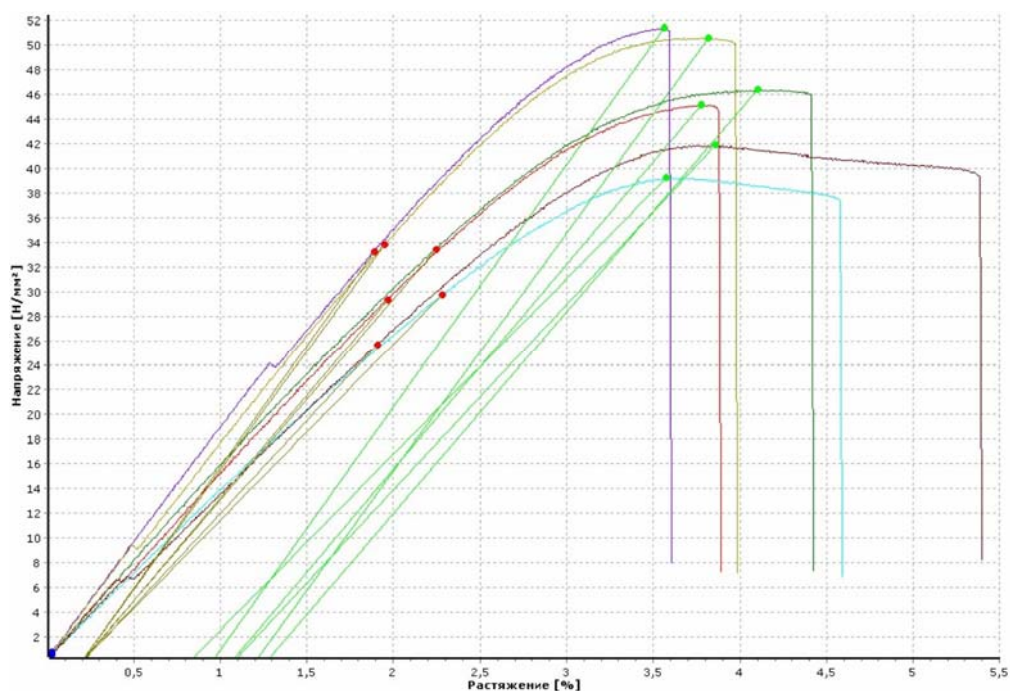


Рис. 4. График зависимости напряжений и деформаций образцов FORMAX



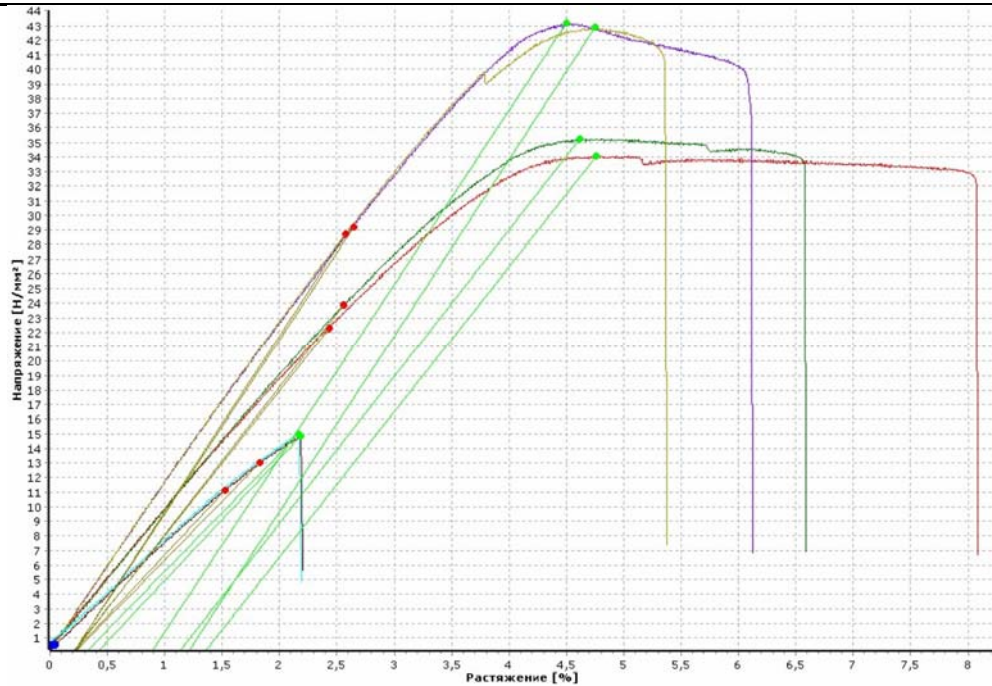


Рис. 5. График зависимости напряжений и деформаций образцов ABS GF-5

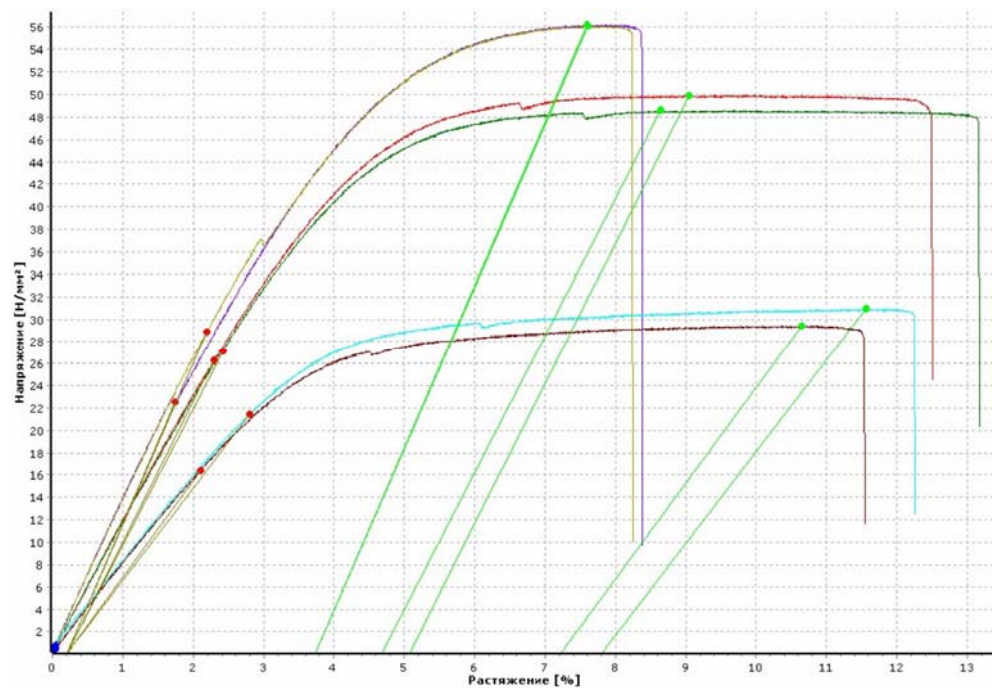


Рис. 6. График зависимости напряжений и деформаций образцов PA ABS GF-8

**Сравнительный анализ результатов.** Из результатов проведённого испытания (см. табл. 2, рис. 4-8) видно, что наибольшее значение (56 МПа) по прочности на разрыв ( $R_m$ ) среди материалов наблюдается у PA ABS GF-8, у образцов №3 и №4, выращенных в направлении горизонтально «ребром». А наименьший результат (15 МПа) – у ABS GF-5, у образцов №5 и №6. Таким образом, можно сделать вывод, что характер печати образцов напрямую оказывает влияние на прочностные характеристики материалов.

Наибольший предел текучести ( $R_{p0,2}$ ) наблюдается у материала FORMAX и составляет 34 МПа (образец №4).

Анализ наибольшего относительного удлинения ( $A_g$ ) показал, что наибольшая величина относительного удлинения (7,80 %) наблюдается у образца №5 материала

РА ABS GF-8. Данная величина относительного удлинения показывает, что испытываемый материал обладает хорошими показателями пластичности при относительно малом пределе прочности.

Для более точного анализа результатов, полученных в ходе эксперимента, были составлены диаграммы (см. рис. 7, 8), наглядно показывающие различия средних значений каждого из исследуемых параметров. Сравнение было сделано как для материала, так и для положения печати образца на 3D-принтере.

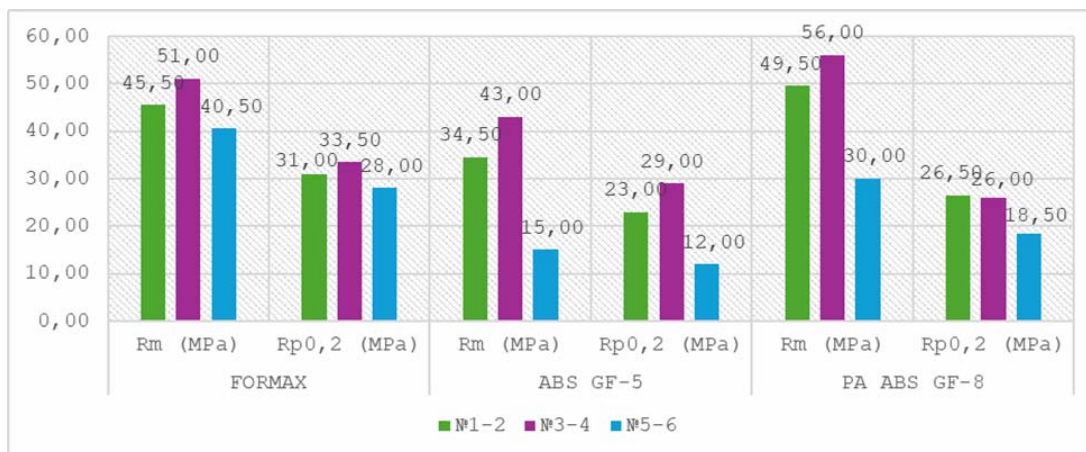


Рис. 7. Диаграмма средних значений предела прочности и предела текучести каждого материала

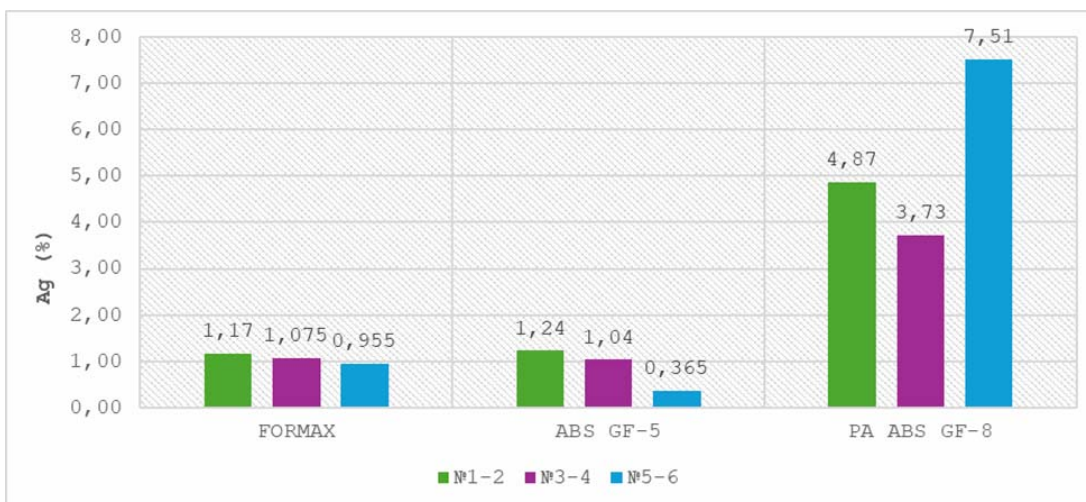


Рис. 8. Диаграмма средних значений относительного удлинения материалов

Из приведённых диаграмм видно, что наименьшими средними показателями обладает материал ABS GF-5. Данный материал отличается хрупкостью и имеет значительно меньшие предел прочности на разрыв и предел текучести при любом способе печати образцов. В целом по данным табл. 2 и диаграммам средних значений (см. рис. 7, 8) видно, что наименьшими показателями обладают образцы, выращенные вертикальным способом. Такой метод печати уменьшает предел прочности и предел текучести материала, делая его более хрупким. Наибольшие значения прочностных характеристик наблюдаются при выращивании горизонтальным положением «ребром». Однако такой способ придаёт материалу низкую пластичность.

**Выводы.** На основе сравнительного анализа механических характеристик материалов и положения их печати можно сделать несколько выводов:

- Средние прочностные характеристики материала FORMAX выше ABS GF-5 примерно на 20-30 %. Относительные удлинения образцов из этих материалов

сопоставимы. Однако для образцов, выращенных вертикальным способом, показатель удлинения материала FORMAX превосходит данный показатель ABS GF-5 более чем на 150 %.

- Наибольшими показателями механических свойств среди всех материалов обладает PA ABS GF-8. Данный материал отличается наибольшей прочностью, хорошей пластичностью и является перспективным для дальнейшего рассмотрения и изучения.

- На основе экспериментальных данных видно, что положение образцов при их печати оказывает значительное влияние на механические характеристики материала.

По результатам экспериментальных исследований к дальнейшему изучению принимается материал PA ABS GF-8, для чего запланированы моделирование работы усиления композитным материалом совместно с железобетонным пролетным строением, а также натурные экспериментальные исследования с разными способами нанесения усиления в условиях действующего производственного участка.

### Список литературы

1. Хрюкин, А.А. Оценка напряженно-деформированного состояния пролетных строений моста, усиленного композитными материалами / А.. Хрюкин, М.В. Смолина // Наука и образование. – 2016. – № 4(84). – С. 100–105. – EDN XYFZJD.
2. Макаров, А.В. Новый способ усиления мостовых пролетных строений из композитных материалов / А.В. Макаров, С.В. Кульбин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – № 48(67). – С. 140–149. – EDN ZOKROJ.
3. Ключев, А.В. Усиление изгибаемых конструкций композитами на основе углеволокна / А.В. Ключев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 38–41. – EDN OAKGPT.
4. Куанышев, Б.М. Оценка эффективности усиления конструкций железнодорожных мостов композитным материалом / Б.М. Куанышев, М.Я. Квашнин // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2016. – № 1(51). – С. 238–244. – EDN VUROLB.
5. Зубцов, В.А. Анализ методов усиления сжатых железобетонных конструкций / В.А. Зубцов // Актуальные исследования. – 2024. – № 20–2(202). – С. 10–14. – EDN KAVWUT.
6. Балдин, Д.Ю. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок / Д.Ю. Балдин, А.Н. Краев, Е.А. Жайсамбаев. – DOI 10.15862/05SATS220 // Транспортные сооружения. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 3. – EDN VYYBSD.
7. Определение оптимального режима FDM-печати композитами для получения требуемых конструкторско-технологических параметров / И.Д. Марканов, Р.А. Вдовин, Е.С. Гончаров, А.О. Фирсин. – DOI 10.25206/2588-0373-2024-8-1-78-85 // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 78–85. – EDN VVJZVJ.
8. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects / M. Doshi, A. Mahale, S. Kumar Singh, S. Deshmukh. – DOI 10.1016/j.matpr.2021.10.003 // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 50. – P. 2269–2275. – EDN EZKRHF.
9. Mohd Khairul Nizam M.A.N.B., The effect of printing orientation on the mechanical properties of FDM 3D printed parts / M.A.N.B. Mohd Khairul Nizam, K.I.B. Ismail, T.C. Yap. – DOI: 10.1007/978-981-19-2890-1\_8 // Innovative Manufacturing, Mechatronics and Materials Forum. – 2021. – Springer, 2022. – P. 75–85.
10. Аннин, Б.Д. Механика композитов / Б.Д. Аннин, Е. В. Карпов. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2024. – 85 с. – (Высшее образование).
11. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов / А.Ю. Попов, К.К. Госина, И.В. Петров [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 3(143). – С. 42–45. – EDN VCNTUT.

12. Идентификация жесткостных характеристик композита / Р.А. Каюмов, Д.Е. Страхов, Ф.Р. Шакирзянов [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 24. – С. 109–112. – EDN XDXXAR.
13. Аверченко, Г.А. Развитие композитов в мостостроении / Г.А. Аверченко, А.В. Квитко // Научные исследования: от теории к практике. – 2016. – № 4-2(10). – С. 10–16. – EDN WYNLRR.
14. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 4(13). – С. 89. – EDN PVXFPP.
15. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения / И. Г. Овчинников, Ш. Н. Валиев, И. И. Овчинников [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 4(13). – С. 90. – EDN PVXFPP.

### References

1. Khryukin, A.A. Assessment of the stress-strain state of bridge spans reinforced with composite materials / A.A. Khryukin, M.V. Smolina // Science and education. – 2016. – No. 4 (84). – P. 100–105. – EDN XYFZJD.
2. Makarov, A.V. New method for strengthening bridge spans made of composite materials / A.V. Makarov, S.V. Kulbin // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. – 2017. – No. 48 (67). – P. 140–149. – EDN ZOKROJ.
3. Klyuev, A.V. Strengthening of bending structures with carbon fiber-based composites / A.V. Klyuev // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 38–41. – EDN OAKGPT.
4. Kuanyshev, B.M. Evaluation of the effectiveness of strengthening railway bridge structures with composite material / B.M. Kuanyshev, M.Ya. Kvashnin // Bulletin of the Kyrgyz State University of Civil Engineering, Transport and Architecture named after N. Isanov. – 2016. – No. 1 (51). – P. 238–244. – EDN VUROLB.
5. Zubtsov, V.A. Analysis of methods for strengthening compressed reinforced concrete structures / V.A. Zubtsov // Current research. – 2024. – No. 20-2(202). – P. 10–14. – EDN KAVWUT.
6. Bal'din, D.Yu. Comparative analysis of methods for strengthening reinforced concrete T-beams / D.Yu. Bal'din, A.N. Kraev, E.A. Zhaisambaev. – DOI 10.15862/05SATS220 // Transport structures. – 2020. – Vol. 7, No. 2. – P. 3. – EDN VYYBSD.
7. Determination of the optimal mode of FDM printing with composites to obtain the required design and technological parameters / I.D. Markanov, R.A. Vdovin, E.S. Goncharov, A.O. Firsin. – DOI 10.25206/2588-0373-2024-8-1-78-85 // Omsk Scientific Bulletin. Series: Aviation, Rocket and Power Engineering. – 2024. – Vol. 8, No. 1. – P. 78–85. – EDN VVJZVJ.
8. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects / M. Doshi, A. Mahale, S. Kumar Singh, S. Deshmukh. – DOI 10.1016/j.matpr.2021.10.003 // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 50. – P. 2269–2275. – EDN EZKRHF.
9. Mohd Khairul Nizam M.A.N.B., The effect of printing orientation on the mechanical properties of FDM 3D printed parts / M.A.N.B. Mohd Khairul Nizam, K.I.B. Ismail, T.C. Yap. – DOI: 10.1007/978-981-19-2890-1\_8 // Innovative Manufacturing, Mechatronics and Materials Forum. – 2021. – Springer, 2022. – P. 75–85.
10. Annin, B.D. Mechanics of composites / B.D. Annin, E.V. Karpov. – 2nd ed. – Moscow : Yurait Publishing House, 2024. – 85 p. – (Higher education).

11. Classification, composition, advantages and disadvantages of multicomponent composite materials / A.Yu. Popov, K.K. Gosina, I. V. Petrov [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2015. – No. 3 (143). – P. 42–45. – EDN VCNTUT.
12. Identification of composite stiffness characteristics / R.A. Kayumov, D.E. Strakhov, F. R. Shakirzyanov [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2016. – Vol. 19, No. 24. – P. 109–112. – EDN XDXXAR.
13. Averchenko, G.A. Development of composites in bridge construction / G.A. Averchenko, A.V. Kvitko // Scientific research: from theory to practice. – 2016. – No. 4–2(10). – P. 10–16. – EDN WYNLRR.
14. Issues of strengthening reinforced concrete structures with composites: 1. Experimental studies of the features of strengthening flexible reinforced concrete structures with composites / I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, I.I. Ovchinnikov [et al.] // Internet journal «Naukovedenie». – 2012. – No. 4(13). – P. 89. – EDN PVXFPP.
15. Issues of strengthening reinforced concrete structures with composites: 2. Full-scale studies of strengthening reinforced concrete structures with composites, emerging problems and ways to solve them / I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, I. I. Ovchinnikov [et al.] // Internet journal «Naukovedenie». – 2012. – No. 4(13). – P. 90. – EDN PVXFPP.

УДК 691.175

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_90

Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарёва

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

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

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

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

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

**Спирин Илья Петрович,**  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: spirinil2000@yandex.ru

**Пивкин Андрей Николаевич,**  
магистрант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: 5927401@mail.ru

National Research Ogarev Mordovia State  
University

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

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

**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

**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

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

**Spirin Ilya Petrovich,**  
Postgraduate student of the Department  
«Building structures»  
E-mail: spirinil2000@yandex.ru

**Pivkin Nikolai Andreevich,**  
Master's student of the Department «Building  
structures»  
E-mail: 5927401@mail.ru

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

## НАТУРНОЕ КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УМЕРЕННОМ, СУБТРОПИЧЕСКОМ, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОМ И АРКТИЧЕСКОМ КЛИМАТАХ

Д.Р. Низин, Т.А. Низина, И.Г. Лукачевская,  
И.А. Чибулаев, И.П. Спирин, Н.А. Пивкин

Представлены результаты исследования изменения упругопрочностных характеристик эпоксидных полимеров строительного назначения на основе смолы Этал-247 с тремя типами отвердителей (Этал-45М, Этал-1472, Этал-М7) в процессе натурального климатического старения. Натурное экспонирование образцов осуществлялось в течение шести месяцев в четырех климатических зонах: умеренно континентальной, субтропической, экстремально холодной и арктической. Установлены различия в характере изменения прочностных показателей и предельного влагосодержания для исследуемых



составов в зависимости от климатической зоны и длительности экспонирования. Выдвинута гипотеза о существовании на диапазоне  $(0, W_{\max}^{\text{кл}})$  точки  $W_1$ , разделяющей линейные участки зависимости с кратно различающимися скоростями изменения прочностных показателей от влагосодержания (МПа/ %).

*Ключевые слова:* эпоксидные полимеры, натурное климатическое старение, упругопрочностные характеристики, влагосодержание, предельное влагосодержание, обратимые и необратимые изменения

## 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

The results of a researching the changes of elastic-strength characteristics of construction epoxy polymers based on Etal-247 resin with three types of hardeners (Etal-45M, Etal-1472, Etal-M7) during natural climatic aging are presented. Natural exposure of specimens has been carried out for six months in four climatic zones: temperate continental, subtropical, extremely cold and arctic. Differences in the nature of changes in strength indicators and maximum moisture content for the studied compositions depending on the climatic zone and exposure duration have been established. A hypothesis is proposed about the existence of a point  $W_1$  on the range  $(0, W_{\max}^{\text{кл}})$  that separates linear sections of the dependence with significantly different rates of change in strength indicators as a function of moisture content (MPa/ %).

*Keywords:* epoxy polymers, natural climatic aging, elastic-strength characteristics, moisture content, maximum moisture content, reversible and irreversible changes

Обеспечение нормативного срока эксплуатации и долговечности зданий и сооружений является одной из наиболее актуальных задач строительной отрасли. Это предполагает наличие достоверных методик количественной оценки изменения свойств используемых строительных материалов, изделий и конструкций, в т.ч. под действием самой распространенной эксплуатационной среды – натуральных климатических факторов. Так как на территории Российской Федерации наблюдается широчайший диапазон варьирования климатических условий, достоверная оценка долговечности материалов предполагает установление паттернов натурального климатического старения, как минимум, для наиболее представительных климатических зон [1–6].

Также важной задачей, требующей своей реализации при проведении климатических испытаний строительных материалов на основе полимерных связующих, является оценка изменения свойств полимеров в различных влажностных состояниях. Наряду с температурой и интенсивностью актинометрических воздействий, влажность окружающего воздуха, варьирующаяся в зависимости как от частоты, вида и интенсивности осадков, так и от сезона экспонирования и даже времени суток, оказывает существенное влияние на упругопрочностные характеристики полимерных материалов [7–10]. Сорбируемая полимерными композитами влага активизирует процессы структурной релаксации, оказывает частично обратимое пластифицирующее воздействие, а также участвует в реакциях гидролиза и доотверждения [11]. В естественных климатических условиях эксплуатации предельное влагонасыщение полимерного материала практически не достигается, однако необходимость учета влияния влагосодержания полимеров, в том числе в их предельных влажностных состояниях (высушенном и влагонасыщенном), крайне важна для понимания работы полимеров в натуральных климатических условиях [12].

В работе представлены результаты исследования образцов на основе эпоксидной смолы Этал-247 и трех отвердителей – Этал-45М, Этал-1472 и Этал-М7 (все – производства АО «ЭПНЦ Эпитал»). Эпоксидная смола Этал-247 представляет собой низковязкую модифицированную смолу с массовой долей эпоксидных групп в диапазоне 21,4÷22,8 % и вязкостью по Брукфильду при 25 °С 650÷750 СПз.

Отвердитель Этал-45М – смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированная салициловой кислотой; Этал-1472 – отвердитель аминного типа; Этал-М7 – прозрачный низковязкий циклоалифатический отвердитель аминного типа.

Натурное экспонирование осуществлялось в четырех различных климатических зонах: умеренно континентальной (г. Саранск), субтропической (г. Геленджик), экстремально холодной (г. Якутск) и арктической (пос. Тикси) – в течение шести месяцев (с декабря 2024 г. по май 2025 г. включительно) на натурных климатических площадках, соответствующих требованиям ГОСТ 9.906-83 «Единая система защиты от коррозии и старения. Станции климатические испытательные. Общие требования». Фиксация действующих факторов окружающей среды (температура, относительная влажность, скорость и направление ветра, количество осадков, актинометрические показатели и др.) выполнялась с помощью станций автоматического контроля.

Определение физико-механических характеристик эпоксидных полимеров осуществлялось на образцах-восьмерках (тип 2 ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»). В рамках экспериментального исследования оценка свойств серий эпоксидных полимеров производилась в трех различных влажностных состояниях: двух предельных (высушенное и влагонасыщенное) и одном равновесно-влажностном, соответствующем моменту снятия образцов с испытательной площадки. В каждой экспериментальной точке испытывалось не менее 8 образцов. Перед выкладкой образцов на испытательную площадку они проходили дополнительную термическую обработку (доотверждение) при температуре 80 °С в течение 6 часов с целью частичной релаксации напряжений, возникающих при изготовлении, а также для минимизации в структуре полимерной матрицы непрореагировавших активных групп.

Влагонасыщение образцов осуществлялось путем их полного погружения в дистиллированную воду при комнатной температуре (23±2) °С. Приведение образцов к состоянию, преимущественно свободному от свободной влаги, проводилось в сушильном шкафу при температуре 60 °С. За момент достижения предельного влажностного состояния (высушенного или влагонасыщенного) принимался момент времени, для которого изменение среднего влагосодержания образцов за каждый из двух последовательных контрольных периодов взвешивания составило менее 0,02 % (в соответствии с ГОСТ Р 56762-2015 «Композиты полимерные. Методы определения влагопоглощения и равновесного состояния»). Перед проведением механических испытаний образцы кондиционировались в эксикаторе при н.у. не менее 18 ч.

Параллельно натурным испытаниям выполнялась оценка изменения свойств образцов-свидетелей, хранившихся в лабораторных условиях в течение идентичных временных интервалов. Их механические свойства также определялись для трех обозначенных выше влажностных состояний.

В качестве исследуемых характеристик образцов эпоксидных полимеров использовали (согласно ГОСТ 11262-2017):

- предел прочности при растяжении ( $\sigma_{pm}$ , МПа);
- предел прочности при разрыве ( $\sigma_{pp}$ , МПа);
- относительное удлинение при максимальной нагрузке ( $\varepsilon_{pm}$ , %);
- относительное удлинение при разрыве ( $\varepsilon_{pp}$ , %);
- модуль упругости ( $E$ , МПа).

Значения влагосодержания образцов ( $W$ , %) для каждой серии фиксировали непосредственно перед проведением механических испытаний.

Результаты, демонстрирующие изменение средних значений контролируемых показателей образцов (серии «высушенные» и «влагонасыщенные»), экспонированных в четырех различных климатических зонах, после статистической обработки представлены в виде графических зависимостей на рис. 1-5. Средние значения влагосодержания серий образцов в зависимости от климатической зоны, длительности экспонирования и влажностного состояния непосредственно перед испытанием приведены в таблице.



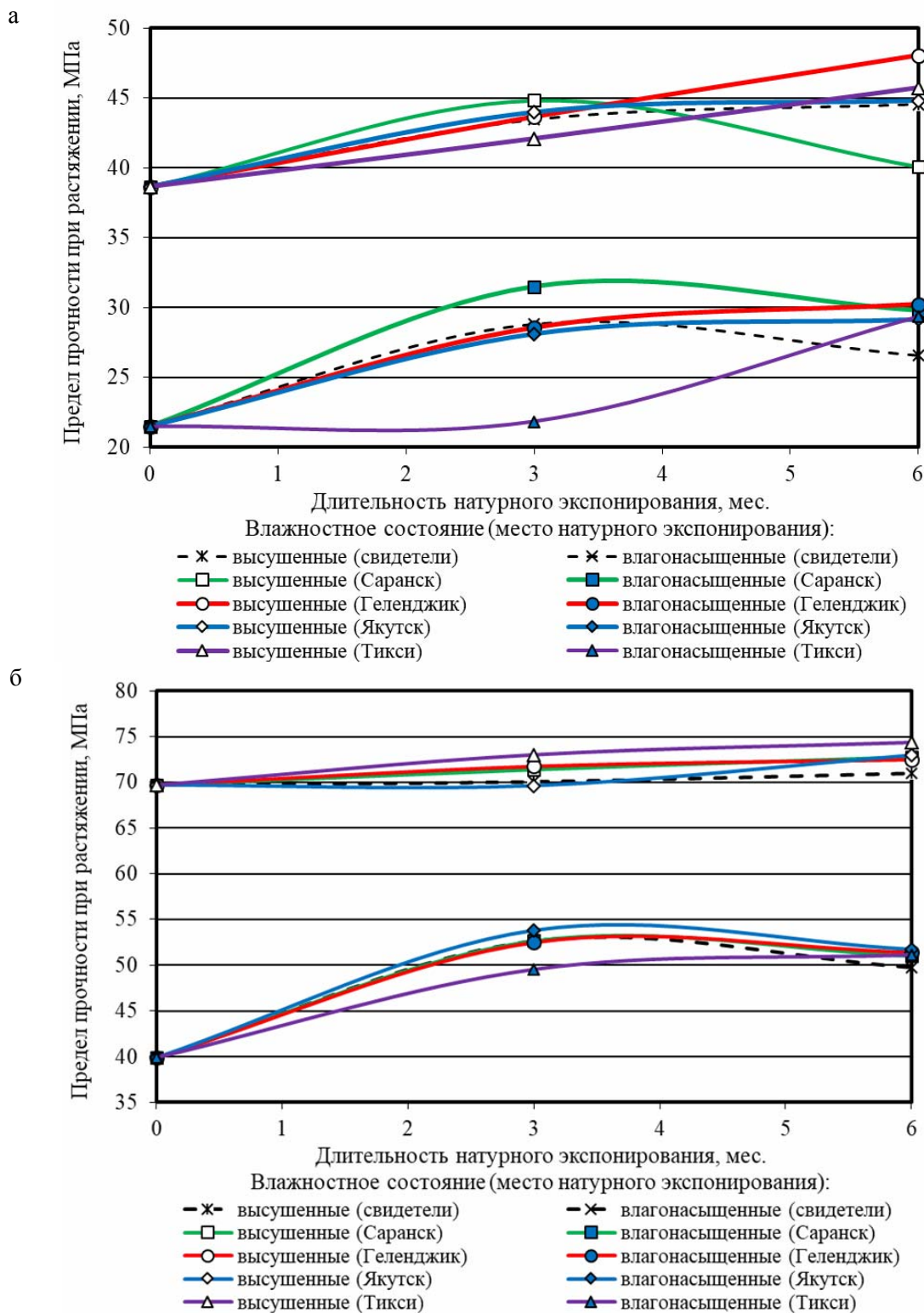


Рис. 1. Изменение предела прочности при растяжении (серии «высушенные» и «влагонасыщенные») эпоксидных полимеров составов Этал-247/Этал-45М (а) и Этал-247/Этал-1472 (б) в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))

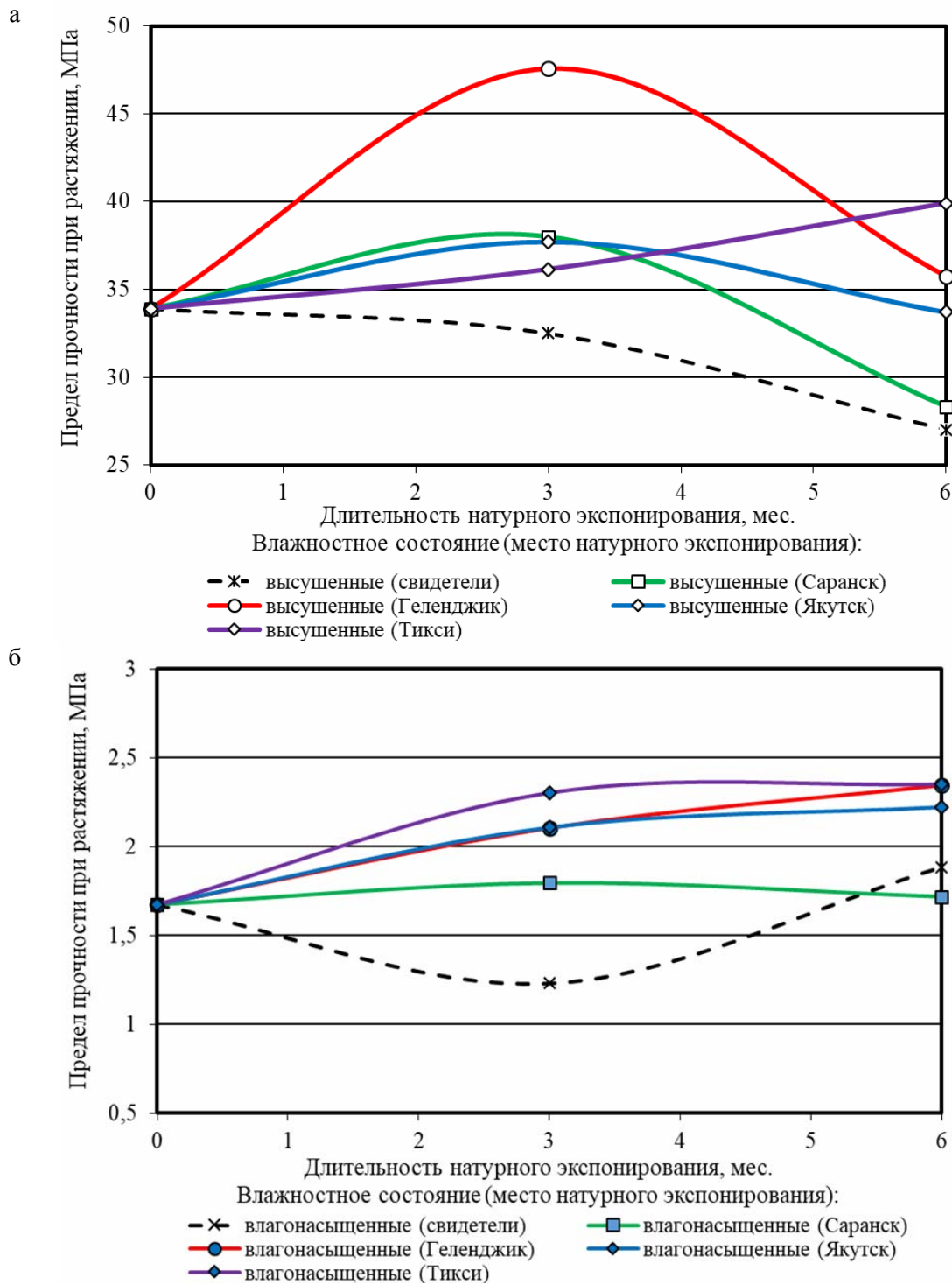


Рис. 2. Изменение предела прочности при растяжении (серии «высушенные» (а) и «влажонасыщенные» (б)) эпоксидного полимера Этал-247/Этал-М7 в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))

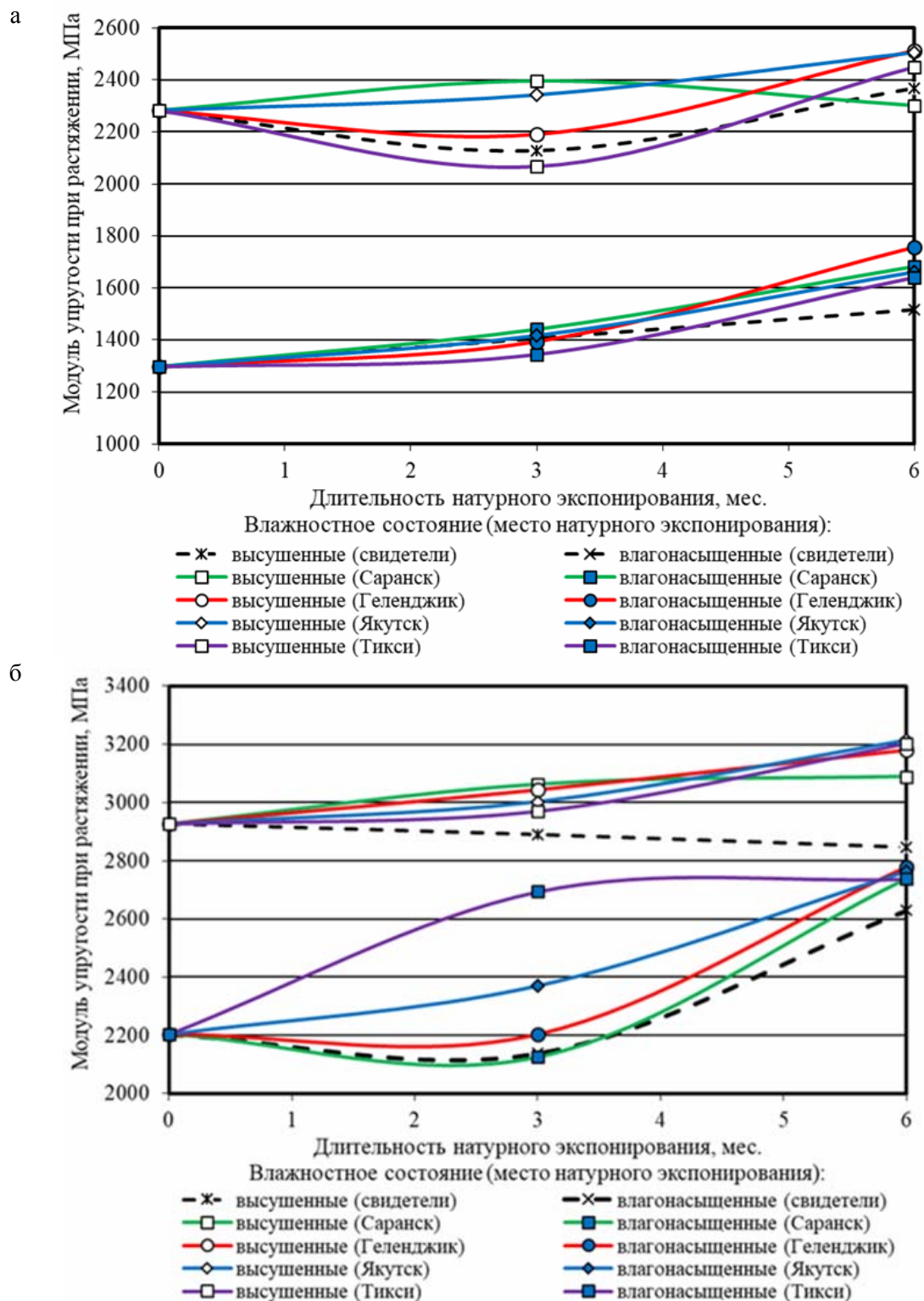


Рис. 3. Изменение модуля упругости при растяжении (серии «высушенные» и «влагонасыщенные») эпоксидных полимеров составов Этал-247/Этал-45М (а) и Этал-247/Этал-1472 (б) в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))

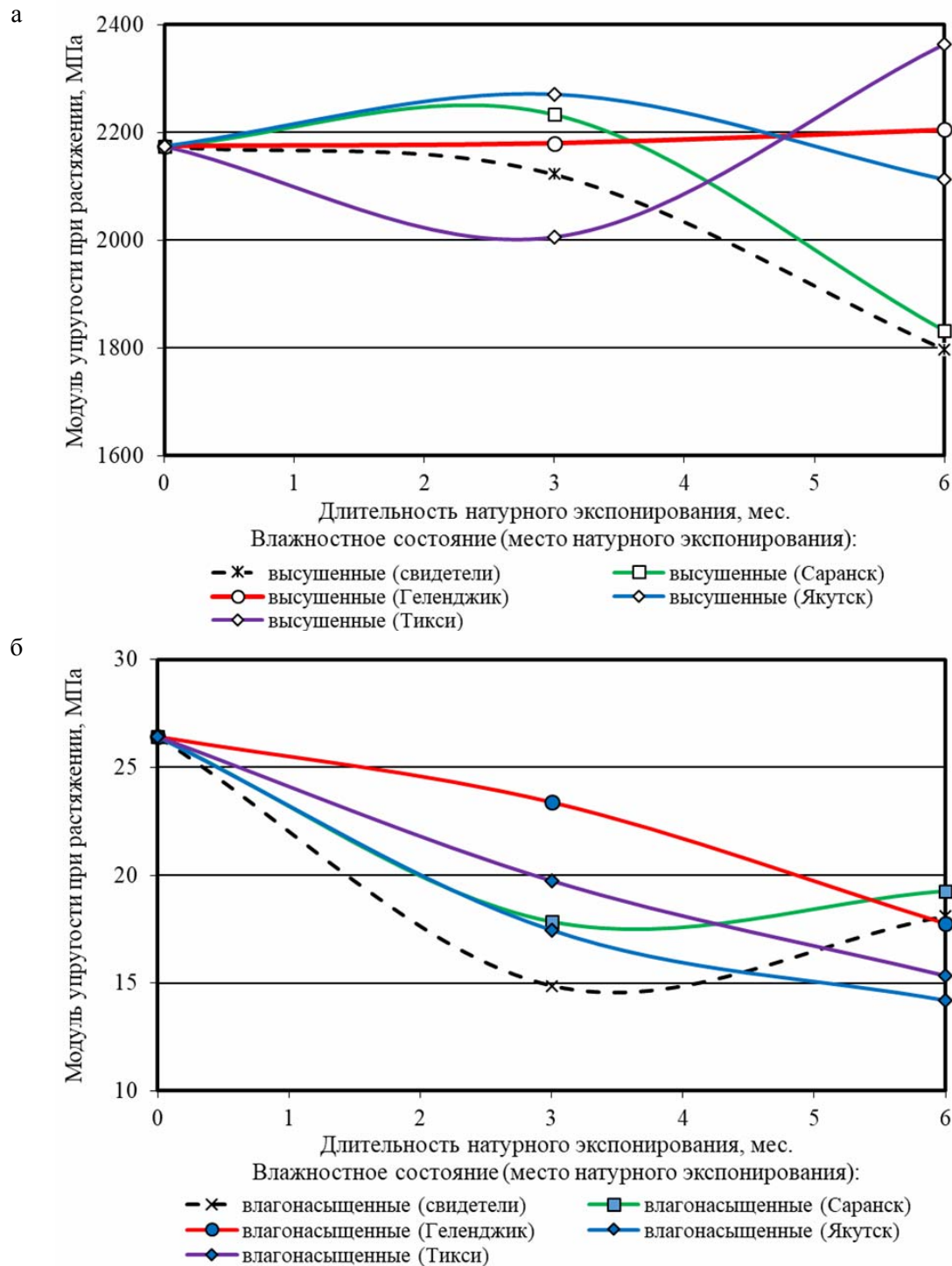


Рис. 4. Изменение модуля упругости при растяжении (серии «высушенные» (а) и «влагонасыщенные» (б)) эпоксидного полимера Этал-247/Этал-М7 в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))

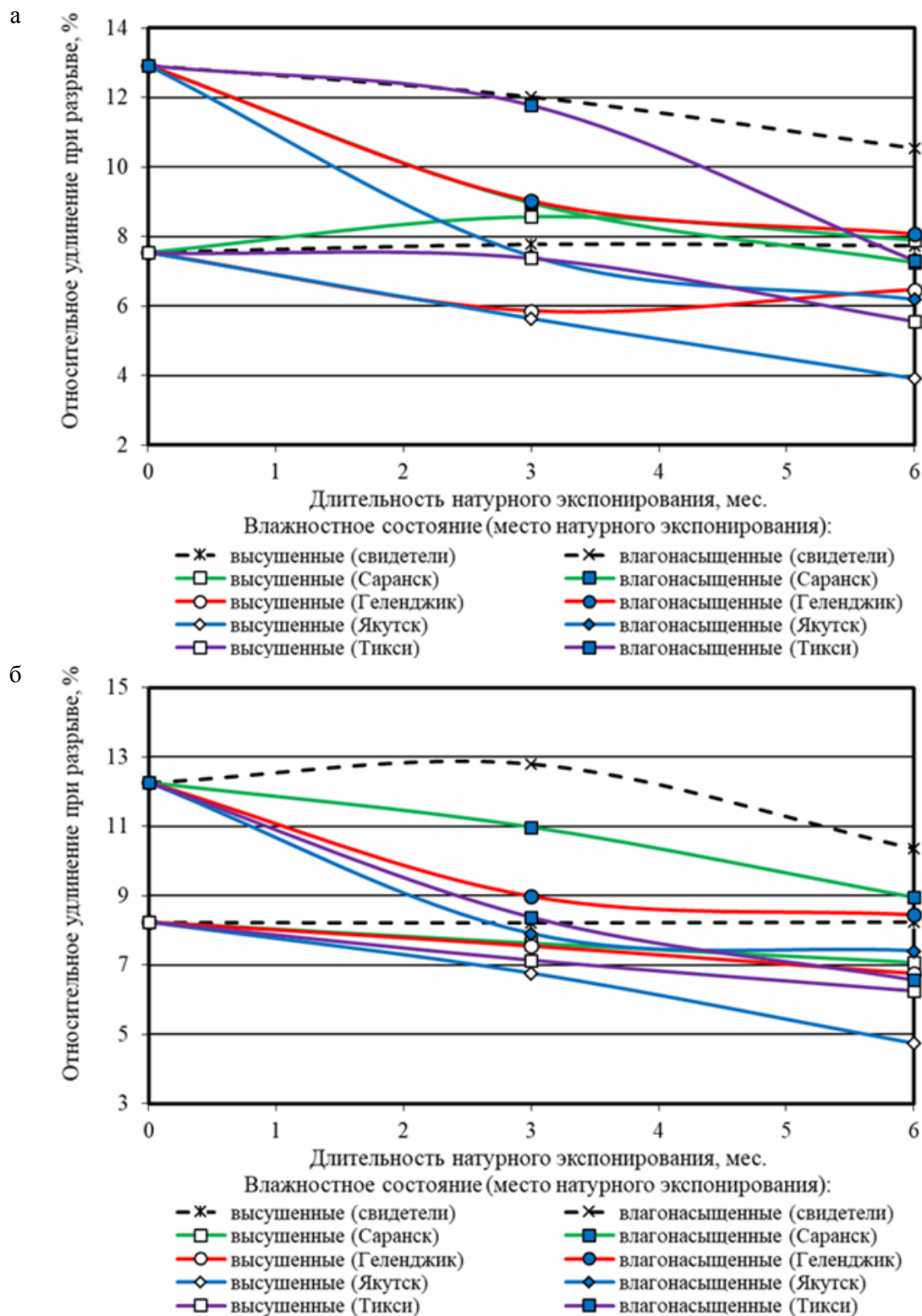


Рис. 5. Изменение относительного удлинения при разрыве (серии «высушенные» и «влагонасыщенные») эпоксидных полимеров составов Этал-247/Этал-45М (а) и Этал-247/Этал-1472 (б) в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))



Значения влагосодержания серий образцов эпоксидных полимеров Этал-247/Этал-45М, Этал-247/Этал-1472 и Этал-247/Этал-М7 в зависимости от климатической зоны, длительности экспонирования и влажностного состояния (серии «высушенные», «равновесные» и «влажносодержащие»)

Климат (населенный пункт)	Длительность экспонирования, мес.	Серии		
		«высу- шенные»	«равно- весные»	«влажонасы- щенные»
Полимер Этал-247/Этал-45М				
Контроль	0	0,023	1,398	2,184
Свидетели	3	0,078	0,559	2,619
	6	0,012	0,460	2,550
Умеренно континентальный (г. Саранск)	3	0,074	1,101	2,790
	6	0,024	0,611	2,407
Субтропический (г. Геленджик)	3	0,049	0,885	2,370
	6	0,010	1,035	2,253
Экстремально холодный (г. Якутск)	3	0,089	0,921	2,903
	6	0,017	0,825	2,707
Арктический (пос. Тикси)	3	0,061	0,782	3,076
	6	0,021	0,588	2,385
Полимер Этал-247/Этал-45М				
Контроль	0	0,023	1,398	2,184
Свидетели	3	0,078	0,559	2,619
	6	0,012	0,460	2,550
Умеренно континентальный (г. Саранск)	3	0,074	1,101	2,790
	6	0,024	0,611	2,407
Субтропический (г. Геленджик)	3	0,049	0,885	2,370
	6	0,010	1,035	2,253
Экстремально холодный (г. Якутск)	3	0,089	0,921	2,903
	6	0,017	0,825	2,707
Арктический (пос. Тикси)	3	0,061	0,782	3,076
	6	0,021	0,588	2,385
Полимер Этал-247/Этал-1472				
Контроль	0	0,013	1,168	3,305
Свидетели	3	0,012	0,120	1,935
	6	0,050	0,130	2,122
Умеренно континентальный (г. Саранск)	3	0,007	0,583	1,960
	6	0,026	0,465	2,189
Субтропический (г. Геленджик)	3	0,040	0,612	1,863
	6	0,010	0,875	1,995
Экстремально холодный (г. Якутск)	3	0,014	0,435	1,990
	6	0,032	0,385	2,211
Арктический (пос. Тикси)	3	0,063	0,324	2,349
	6	0,008	0,397	1,882
Полимер Этал-247/Этал-М7				
Контроль	0	0,023	4,662	7,425
Свидетели	3	0,002	0,128	10,570
	6	0,038	0,217	9,015
Умеренно континентальный (г. Саранск)	3	0,008	2,843	10,450
	6	0,043	1,700	9,221
Субтропический (г. Геленджик)	3	0,091	1,628	10,085
	6	0,038	3,597	8,916
Экстремально холодный (г. Якутск)	3	0,086	1,229	10,939
	6	0,024	1,629	9,710
Арктический (пос. Тикси)	3	0,140	1,025	10,344
	6	0,007	0,900	9,122

По результатам проведенных исследований выявлены существенные различия в изменении свойств исследуемых полимеров. В частности, для образцов состава Этал-247/Этал-45М наблюдалось повышение предела прочности при растяжении в зависимости от длительности экспонирования как при воздействии природных климатических факторов, так и в процессе хранения (см. рис. 1). По сравнению с образцами в контрольном состоянии (серия «высушенные») выявлен прирост показателей к 6 месяцам натурального экспонирования в умеренно континентальном, субтропическом, экстремально холодном и арктическом климате соответственно на 3,7; 24,3; 16,0 и 18,3 % (рис. 1, а); для серии «влажносодержащие» прирост показателей составил 38,7; 40,8; 35,6 и 36,8 %. При этом для образцов-свидетелей состава Этал-247/Этал-45М хранение в течение 6 месяцев приводит к повышению предела прочности при растяжении на 15,3 и 23,7 % для высушенного и влажносодержащего влажностных состояний соответственно.

Анализ данных, представленных в таблице, свидетельствует о существенных различиях в уровне предельного влажносодержания для полимера Этал-247/Этал-М7 по сравнению с Этал-247/Этал-45М и Этал-247/Этал-1472. В частности, концентрация влаги в структуре полимеров, отверждаемых Этал-45М, Этал-1472 и Этал-М7, повышается, достигая соответственно значений 2,184; 3,305 и 7,425 %. После экспонирования в течение 3 и 6 месяцев в условиях четырех различных климатов предельное влажносодержание для полимеров Этал-247/Этал-45М и Этал-247/Этал-М7 повышается до  $2,253 \div 3,076$  и  $8,916 \div 10,939$  %. Во всех случаях нижние уровни вышеуказанных интервалов изменения предельной концентрации влаги наблюдаются для субтропического климата, наибольшие – для экстремально холодного и арктического. Для полимера Этал-247/Этал-1472, напротив, предельное влажосодержание снижается до уровней  $1,863 \div 2,349$  %. Общая тенденция изменения концентрации влаги серии «влажносодержащие» сохраняется и для образцов-свидетелей, что говорит о протекающих в структуре полимеров изменениях в процессе хранения.

Анализ изменения предела прочности при растяжении для полимера Этал-247/Этал-1472 показал (рис. 1, б) незначительное варьирование свойств в зависимости от климатической зоны. Для серии «высушенные» наблюдается повышение прочностной характеристики в процессе экспонирования не более чем на 6,7 %, что свидетельствует о достаточной стабильности структуры данного полимера. При этом необходимо отметить достаточно высокие исходные показатели предела прочности при растяжении для полимера Этал-247/Этал-1472, составляющие в контрольном высушенном состоянии порядка 70 МПа, что почти в два раза превышает прочностные показатели полимеров, отверждаемых отвердителями Этал-45М и Этал-М7. Для серии «влажносодержащие» полимера Этал-247/Этал-1472 прирост предела прочности при растяжении достигает  $24,8 \div 29,6$  % по сравнению с исходным показателем.

Наиболее существенное изменение предела текучести в предельных влажностных состояниях, составляющее для контрольной серии 20 раз, выявлено для полимера Этал-247/Этал-М7 (см. рис. 2). Для высушенных образцов данного состава наблюдается повышение ( $11,3 \div 40,3$  % от контроля) предела прочности при растяжении через 3 месяца экспонирования, наиболее ярко проявляющееся для субтропического климата, с последующим снижением показателей к 6 месяцам. Исключение составляет серия образцов, экспонированная в условиях арктического климата, – практически монотонный прирост прочности, достигающий 17,7 % от исходных показателей. Предел прочности при растяжении для влажносодержащих образцов для всех климатических зон и образцов-свидетелей не превышает 2,5 МПа, что свидетельствует о невозможности эксплуатации данного полимера в условиях повышенной влажности.

Анализ изменения модуля упругости полимеров, отверждаемых Этал-45М и Этал-1472, в процессе натурального климатического старения (см. рис. 3) указывает на повышение жесткости их структуры. Прирост данного показателя для серий «высушенные» и «влажносодержащие» полимера Этал-247/Этал-1472 через 6 месяцев натурального экспонирования достигает (рис. 3, б) соответственно  $5,6 \div 9,8$  и  $24,2 \div 26,1$  %. При этом для образцов-свидетелей жесткость в высушенном состоянии практически не меняется



(повышается на 19,3 % лишь для серии «влажгонасыщенные»). В целом разброс модуля упругости в процессе климатического старения для серий в предельных влажностных состояниях сужается – от 722 до 311÷464 МПа. Для образцов-свидетелей данный диапазон уменьшается до 216 МПа.

Для полимера Этал-247/Этал-М7 в зависимости от влажностного состояния также наблюдается снижение модуля упругости (см. рис. 4) практически на 2 порядка (в 82 раза). При этом к 6 месяцам экспонирования уменьшается модуль упругости для всех серий образцов, кроме экспонированных в субтропическом и арктическом климатах (серия «высушенные»). Для образцов-свидетелей в высушенном состоянии зафиксировано ярко выраженное снижение модуля упругости, достигающее 17,4 % от контрольных показателей.

Влагонасыщение серий образцов полимеров Этал-247/Этал-45М и Этал-247/Этал-1472 приводит к повышению относительного удлинения при разрыве в 1,7 и 1,5 раза соответственно (см. рис. 5). Натурное экспонирование с последующим высушиванием приводит к охрупчиванию всех серий вышеуказанных полимеров, что подтверждается анализом графических зависимостей (см. рис. 5). Для серий «влажгонасыщенные» процесс охрупчивания выражен менее явно, причем для образцов-свидетелей, не подвергаемых воздействию натуральных климатических факторов, данная характеристика практически не меняется. Изменение относительного удлинения при разрыве для полимера, отверждаемого Этал-М7, носит иной характер (рис. 6): данный показатель повышается для всех серий во влажгонасыщенном состоянии.

С учетом обозначенного количественного влияния климатического старения и влагосодержания на изменение упругопрочностных свойств эпоксидных полимеров проведен анализ корреляционных зависимостей (рис. 7–9) между пределом прочности при растяжении образцов исследуемых составов в контрольном состоянии и после натурального экспонирования (вне зависимости от длительности и климатической зоны). Следует отметить, что для ранних этапов климатического старения (до 6 месяцев) для составов на основе отвердителей Этал-45М и Этал-1472 (см. рис. 7–8) помимо практически повсеместного прироста прочностных показателей как после натурального старения, так и в ходе хранения (серия «свидетели») наблюдается неизменность общей формы зависимости предела прочности при растяжении от влагосодержания. При этом скорость изменения прочностных показателей на большей части диапазона  $(0, W_{\max})$  для обозначенных составов снизилась по сравнению с образцами в контрольном состоянии.

Различие в характере изменения зависимости « $\sigma_{\text{рм}} - W$ » отражено в изменении показателя  $W_{\max}^{\text{кл}}$ . Так, если для состава на основе отвердителя Этал-45М в возрасте 3 месяцев наблюдается увеличение предельного влагосодержания от 10 до 40 % в зависимости от условий экспонирования, то для 6 месяцев выявлено уменьшение обозначенного прироста до уровня 5–20 %. Для полимера Этал-247/Этал-1472, напротив, отмечено падение предельного влагосодержания по сравнению с контрольным состоянием от 30 до 50 %, вне зависимости от условий экспонирования. В совокупности это указывает на единовременное присутствие в течение натурального климатического старения конкурирующих процессов изменения массы. Безусловно, на основе накопленного опыта исследования полимеров в ходе натурального климатического старения можно сделать вывод о необратимом характере данных изменений, однако представленные результаты также позволяют выдвинуть гипотезу о частичной обратимости возникающих изменений, особенно на ранних этапах климатического старения. В целом это указывает на необходимость более комплексного изучения ранних этапов климатического старения эпоксидных полимеров – в т.ч. в связи с отмеченным наличием возвратного движения предельного влагосодержания образцов состава Этал-247/Этал-45М для возраста 3 и 6 месяцев.

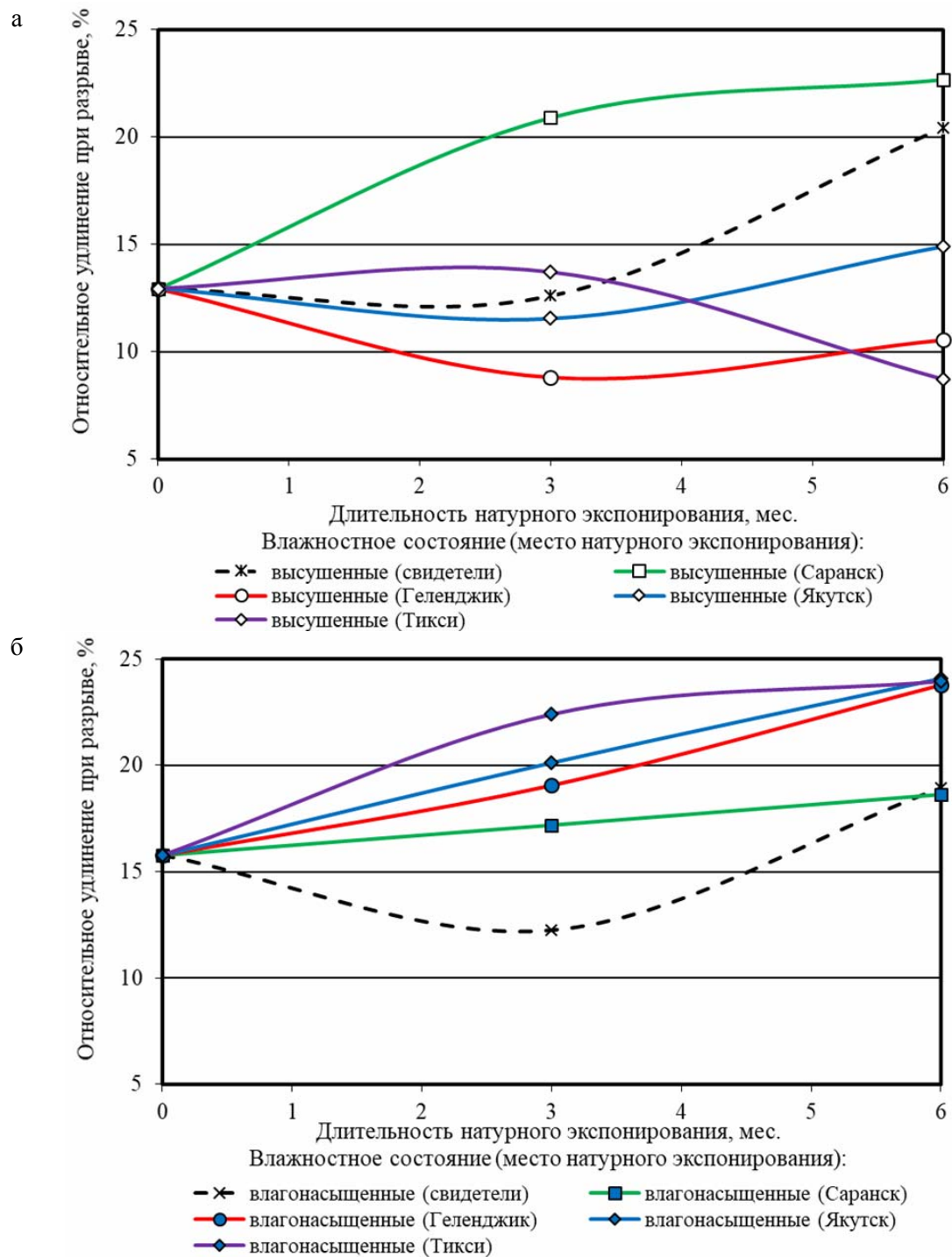


Рис. 6. Изменение относительного удлинения при разрыве (серии «высушенные» (а) и «влагонасыщенные» (б)) эпоксидного полимера Этал-247/Этал-М7 в зависимости от длительности хранения или натурального экспонирования в различных климатических зонах (умеренно континентальный (г. Саранск), субтропический (г. Геленджик), экстремально холодный (г. Якутск) и арктический (пос. Тикси))

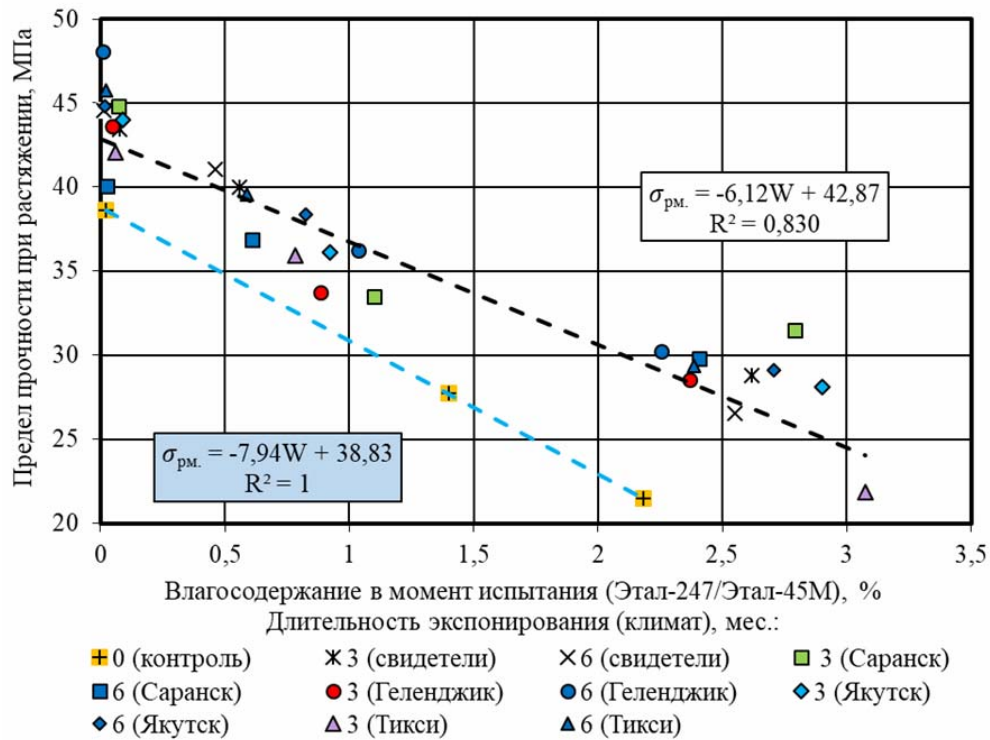


Рис. 7. Корреляционные зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием серий образцов Этал-247/Этал-45М для контрольного состояния (синий штрихпунктир) и после хранения и экспонирования в течение 3 и 6 месяцев (черный штрихпунктир)

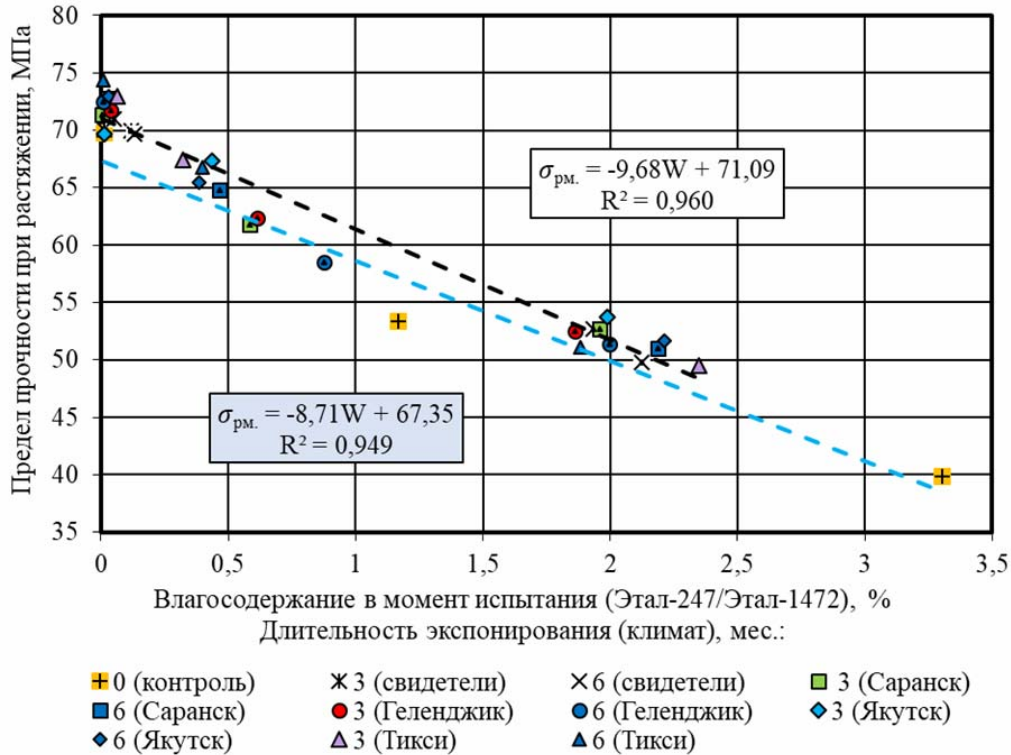


Рис. 8. Корреляционные зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием серий образцов Этал-247/Этал-1472 для контрольного состояния (синий штрихпунктир) и после хранения и экспонирования в течение 3 и 6 месяцев (черный штрихпунктир)

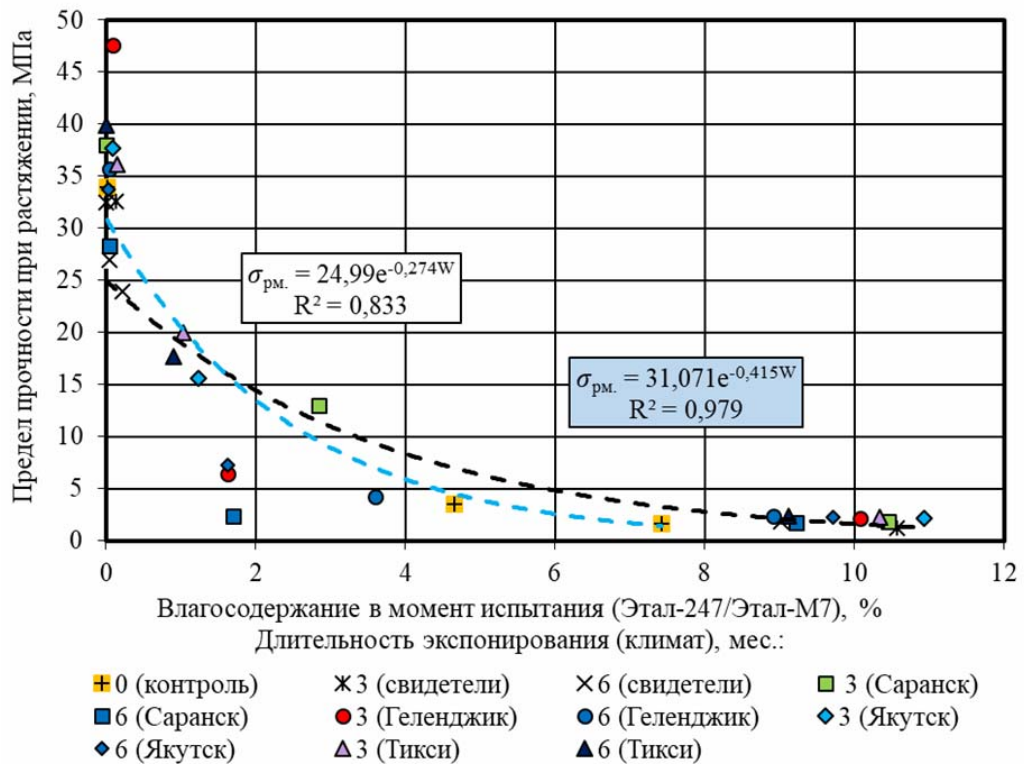


Рис. 9. Корреляционные зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием серий образцов Этал-247/Этал-М7 для контрольного состояния (синий штрихпунктир) и после хранения и экспонирования в течение 3 и 6 месяцев (черный штрихпунктир)

Как отмечалось в [13, 14], варьирование влагосодержания в относительно широком диапазоне в окрестностях  $W_{\text{max}}$  практически не сопровождается изменением прочностных показателей. И, несмотря на достаточно высокую точность аппроксимации представленных результатов ( $R^2 > 0,8$ ) с помощью линейной зависимости, очевидно существование (предположительно – в ходе натурального климатического старения) эффекта неравномерного влияния сорбированной влаги на разных участках диапазона  $(0, W_{\text{max}}^{\text{кл}})$ . Так, для состава Этал-247/Этал-1472 (см. рис. 8) можно предположить существование некоторой точки  $W \sim W_1$ , разделяющей диапазон  $(0, W_{\text{max}}^{\text{кл}})$  на две части с кратно различной скоростью изменения целевого показателя (МПа/ %). Форма зависимости при этом может быть пересмотрена в сторону сочетания двух линейных зависимостей – с большим (в диапазоне от  $\sim 0$  до  $W_1$ ) и меньшим (в диапазоне от  $W_1$  до  $W_{\text{max}}$ ) наклоном к отрицательному направлению оси абсцисс.

Отдельного рассмотрения заслуживает полимер Этал-247/Этал-М7 в первую очередь по причине отмеченного ранее кратно падения показателей прочности и модуля упругости с увеличением влагосодержания. Для него отмеченные ранее различия в скорости изменения механической прочности в зависимости от влагосодержания также наблюдаются, причем более 90 % вариативности значений приходится менее чем на 20 % диапазона  $(0, W_{\text{max}}^{\text{кл}})$ . В отличие от предшествующих составов полученные для Этал-247/Этал-М7 результаты могут быть с высокой степенью точности ( $R^2 > 0,8$ ) описаны экспоненциальной зависимостью. Однако, по аналогии с составом Этал-1472, полученные значения также могут быть с высокой степенью достоверности описаны совокупностью двух линейных зависимостей различного наклона, сходящихся в точке  $W \sim W_1$ , причем правая будет практически параллельна оси абсцисс. В целом для

обозначенного состава вопрос сохранения влагосодержания в заданном диапазоне (преимущественно меньше  $W_1$ ) становится крайне актуальным.

На основе представленных результатов можно утверждать, что ранний этап натурального климатического старения представляет собой совокупность синергетических и нейтрализующих эффектов совместного протекания широкого перечня процессов, проявляющихся в разнонаправленном изменении ключевых эксплуатационных показателей полимеров строительного назначения. При этом вид используемого отвердителя существенно влияет на количественное соотношение возникающих усиливающих и компенсирующих эффектов. Роль климатических условий натурального экспонирования, в свою очередь, оказывает значительно меньший эффект в сравнении с влажностным состоянием полимерного материала.

### Список литературы

1. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Старцева, д-ра техн. наук, проф. В.Т. Ерофеева, д-ра техн. наук, проф. В.П. Селяева. – Москва : Издательство АСВ, 2017. – 558 с.
2. Низина, Т.А. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате : монография / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 188 с.
3. Каблов, Е.Н. Старение полимерных композиционных материалов / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев, А.Б. Лаптев. – Москва : НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. – 536 с.
4. Каблов, Е.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 11. – С. 19–27.
5. Старцев, В.О. Методы исследования старения полимерных связующих / В.О. Старцев // Клеи. Герметики. Технологии. – 2020. – №9. – С. 16–26.
6. 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.
7. Низин, Д.Р. Изменение влагосодержания образцов эпоксидных полимеров в условиях натурального климатического старения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.А. Климентьева, Н.С. Канаева // Климат-2021: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы : материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 2021. – С. 41–52.
8. Низина, Т.А. Влияние влажностного состояния на кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева, Д.А. Климентьева, А.А. Порватова // Эксперт: теория и практика. – 2022. – №1. – С. 37–45.
9. Старцев, В.О. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями / В.О. Старцев, С.В. Панин, О.В. Старцев // Механика композитных материалов. – 2015. – №6. – С. 1081–1094.
10. Maxwell, A.S. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials / A.S. Maxwell, W.R. Broughton, G. Dean, G.D. Sims // NPL Report DEPC MPR 016. 2005.
11. Старцев, В.О. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях / В.О. Старцев, В.И. Плотников, Ю.В. Антипов // Труды ВИАМ. – 2018. – №5. – С. 110–118.
12. Низин, Д.Р. Анализ влияния климатических факторов на изменение физико-механических характеристик полимерных материалов с учетом их влагосодержания / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, И.П. Спирин // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТМТ-2023 : сборник научных трудов Восьмой Междунар. науч.-практ. конф. – Москва, 2023. – С. 275–279.
13. Низин, Д.Р. Моделирование влияния влагосодержания на эксплуатационные свойства эпоксидных полимеров с учетом натурального климатического старения /

Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, И.П. Спирин // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения : материалы VII Всероссийской науч.-техн. конф. 24.11.2023 г. – Москва : НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. – С. 171–194.

14. Низин, Д.Р. Учет влажностного состояния полимерных материалов при разработке моделей машинного обучения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, И.П. Спирин // Строительные материалы. – 2024. – №12. – С. 57–67.

#### References

1. Climate Tests of Building Materials / Edited by Dr. O.V. Startsev, Dr. V.T. Erofeev, and Dr. V.P. Selyaev. – Moscow : ASV Publishing House, 2017. – 558 p.

2. Nizina, T.A. Climate resistance of epoxy polymers in a moderately continental climate : monograph / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin. – Saransk : Izdatel'stvo Mordovskogo Universiteta, 2020. – 188 p.

3. Kablov, E.N. Aging of Polymer Composite Materials / E.N. Kablov, V.O. Startsev, A.B. Laptev. – Moscow : Kurchatov Institute Research Center NITS "Kurchatovskiy institut" – VIAM, 2023. – 536 p.

4. Kablov, E.N. Climatic Aging of Composite Materials for Aviation Purposes. I. Aging Mechanisms / E.N. Kablov, O.V. Startsev, A.S. Krotov, V.N. Kirillov // Deformation and Fracture of Materials. – 2010. – No. 11. – P. 19–27.

5. Startsev, V.O. Methods for Studying the Aging of Polymer Binders / V.O. Startsev // Adhesives. Sealants. Technologies. – 2020. – No. 9. – P. 16–26.

6. Startsev, O.V. Aging of Polymer Composite Materials in an Extremely Cold Climate / O.V. Startsev, M.P. Lebedev, A.K. Kychkin // Izvestiya of the Altai State University. – 2020. – No. 1 (111). – P. 41–51.

7. Nizin, D.R. Change in moisture content of epoxy polymer samples under natural climatic aging conditions / D.R. Nizin, T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.A. Klimentyeva, N.S. Kanaeva. / Climate-2021: Modern Approaches to Assessing the Impact of External Factors on Materials and Complex Technical Systems : Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference. – Moscow, 2021. – P. 41–52.

8. Nizina, T.A. Influence of the moisture state on the kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples under the action of tensile stresses / T.A. Nizina, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva, D.A. Klimentyeva, A.A. Porvatova // Expert: Theory and Practice. – 2022. – No. 1. – P. 37–45.

9. Startsev, V.O. Sorption and Diffusion of Moisture in Polymer Composite Materials with Impact Damage / V.O. Startsev, S.V. Panin, and O.V. Startsev // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – No. 6. – P. 1081–1094.

10. Maxwell, A.S. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials / A.S. Maxwell, W.R. Broughton, G. Dean, G.D. Sims // NPL Report DEPC MPR 016. 2005.

11. Startsev, V.O. Reversible effects of moisture in determining the mechanical properties of PCBs under climatic influences / V.O. Startsev, V.I. Plotnikov, Yu.V. Antipov // Trudy of VIAM. – 2018. – No. 5. – P. 110–118.

12. Nizin, D.R. Analysis of the influence of climatic factors on changes in physical and chemical properties/mechanical characteristics of polymer materials taking into account their moisture content / D.R. Nizin, T.A. Nizina, V.P. Selyaev, I.P. Spirin // Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal processes) SETMT-2023 : collection of scientific papers of the eighth International Scientific and practical conference. – Moscow, 2023. – P. 275–279.

13. Nizin, D.R. Modeling the Influence of Moisture Content on the Performance Properties of Epoxy Polymers, Taking into Account Natural Climatic Aging / D.R. Nizin, T.A. Nizina, V.P. Selyaev, and I.P. Spirin // Polymer Composite Materials and New Generation Manufacturing Technologies : Materials of VII All-Russian Scientific and Technical Conference. 24.11.2023. – Moscow : RIC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023. – P. 171–194.

14. Nizin, D.R. Accounting for the moisture state of polymer materials in the development of machine learning models / D.R. Nizin, T.A. Nizina, V.P. Selyaev, I.P. Spirin // Construction Materials. – 2024. – No. 12. – P. 57–67.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 624.011.1

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_106

*Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
им. Н. П. Огарева*

Россия, 430005, г. Саранск,  
ул. Большевистская, д. 68,  
тел.: (8342)47-29-13; факс: (8342)47-29-13

**Селяев Владимир Павлович**,  
академик РААСН, доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой «Строительные  
конструкции»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Лазарев Александр Львович**,  
кандидат технических наук, доцент  
E-mail: aleks-laz@yandex.ru

**Архипов Игорь Владимирович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: arhipov\_igor2000@list.ru

*National Research Mordovian State University  
named after N.P. Ogarev*

Russia, 430005, Saransk,  
68, Bolshevistskaya St.,  
tel.: +7(8342)47-29-13; fax: +7(8342)47-29-13

**Selyaev Vladimir Pavlovich**,  
Academician of the Russian Academy of  
Architectural and Construction Sciences,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Building Structures»  
E-mail: ntorm80@mail.ru

**Lazarev Aleksander Lvovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
E-mail: aleks-laz@yandex.ru

**Arhipov Igor Vladimirovich**,  
Postgraduate of the Department «Building  
Structures»  
E-mail: arhipov\_igor2000@list.ru

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ЦЕЛЬНОЙ И КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В.П. Селяев, А.Л. Лазарев, И.В. Архипов

Приведены результаты анализа экспериментальных исследований трещиностойкости цельной и клееной древесины. Обоснован выбор методики расчета коэффициента интенсивности напряжений для данных материалов. Определено влияние различных факторов на данный показатель (скорость нагружения, длина трещины, режим нагружения), и получены корреляционные зависимости между ними.

*Ключевые слова: клееная древесина, механика разрушения, напряжение, коэффициент интенсивности, трещиностойкость*

### DETERMINATION OF THE STRESS INTENSITY FACTOR OF SOLID AND GLUED WOOD

V.P. Selyaev, A.L. Lazarev, I.V. Arhipov

The article presents the results of an analysis of experimental studies of crack resistance of solid and glued wood. The choice of the SIF calculation method for these materials is justified. The



influence of various factors on this indicator (loading speed, crack length, loading mode) has been determined, and correlations between them have been obtained.

*Keywords: glued laminated timber, fracture mechanics, stress, intensity factor, crack resistance*

Определение механизма и характера разрушения строительных материалов и изделий из них имеет огромное значение в технических науках, так как позволяет понять кинетику развития основных процессов, происходящих в конструкции при ее нагружении. Понимание механизмов развития этих процессов является ключевым аспектом при контроле параметров прочности, надежности и долговечности. Особое внимание в последнее время уделяется изучению процесса зарождения и развития трещин, которые являются дополнительными концентраторами напряжений в материале. Согласно А. Гриффитсу, в момент достижения в устье трещины критического значения напряжения (своей теоретической прочности) происходит ее стремительное увеличение, а впоследствии и разрушение самой конструкции [1]. Поэтому значительное внимание в механике разрушения уделяется изучению способности материалов сопротивляться трещинообразованию – трещиностойкости.

Вопрос трещиностойкости изотропных и композитных материалов, к числу которых можно отнести бетоны, металлы и пластмассы, достаточно глубоко изучался научным сообществом: получена большая база экспериментальных данных, разработаны соответствующие теории и методики. Здесь можно выделить работы Г.П. Черепанова, В.В. Панасюка, Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, В.П. Трощенко и др. В случае же анизотропных и ортотропных материалов, к примеру древесины, наблюдается значительный дефицит экспериментальных данных. Однако исследования в данном направлении ведутся, и здесь можно выделить работы М.М. Гаппоева, В.А. Кабанова, Д.В. Авдякова, А.Я. Найчука, А.В. Масалова и др.

В качестве основного показателя трещиностойкости материала Ирвином Дж. был предложен коэффициент интенсивности напряжений (критерий Ирвина) [2].

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) представляет собой величину, характеризующую распределение напряжений вблизи вершины трещины в материале. Согласно экспериментальным данным, разрушение материалов происходит лишь двумя способами: отрывом и сдвигом [3, 4]. Вследствие этого выделяют два основных типа КИН, которые возникают в случае нормального отрыва ( $K_I$ ) и сдвига ( $K_{II}$ ), последний из которых разделяется для ортотропных материалов на продольный и поперечный.

В общем случае КИН определяется как

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y, \quad (1)$$

где  $Y$  – безразмерный коэффициент (К-тарировка), характеризующий геометрию образца и самой трещины;  $a$  – длина трещины;  $\sigma$  – нормальные напряжения, возникающие в образце.

Поскольку древесина – это ортотропный материал, то изучение процесса ее разрушения необходимо начинать с сопоставления с изотропными материалами. Так, согласно [5, 6], разница в значениях ортотропного и изотропного КИН при растяжении и чистом изгибе составляет 7 %. В случае испытания консольных балок с торцевой трещиной на разрыв – 25 % [7]. Следовательно, учет анизотропии при исследовании показателя трещиностойкости материала является необходимым.

На данный момент в рамках механики разрушения для изотропных материалов уже разработаны и стандартизированы методы оценки основных критериев трещиностойкости [8, 9]. Для древесины (клееной, цельной) общепринятой методики до сих пор не существует. Поэтому для контроля данного параметра предлагается применять методы, которые получили широкое распространение при испытаниях бетонных, железобетонных и стальных конструкций.

В данной работе в качестве основной была выбрана методика оценки трещиностойкости бетонов (ГОСТ 29167-2021) [9]. Не секрет, что клееная древесина наиболее хорошо работает на изгиб. Поэтому в качестве основного образца для испы-

таний был выбран первый тип – образцы призматические с краевой трещиной в растянутой зоне для испытаний на трехточечный изгиб по первому случаю разрушения – нормального отрыва (рис. 1).

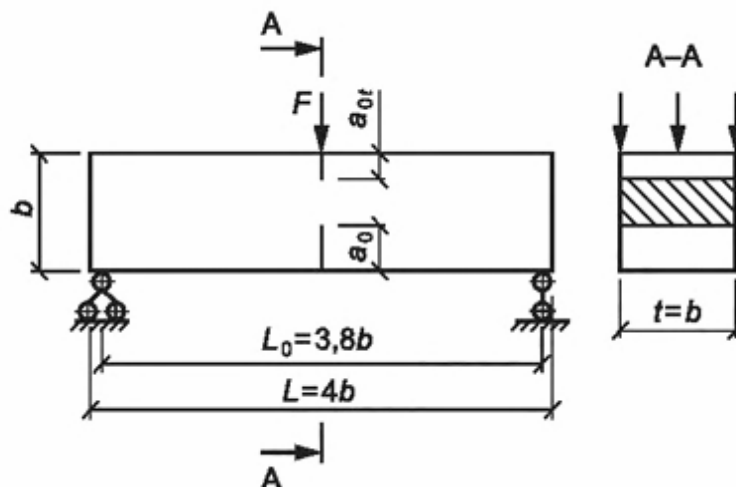


Рис. 1. Испытываемый образец

Для испытаний были выбраны образцы цельной и клееной древесины с основными размерами  $b = 40$  мм,  $t = 40$  мм,  $L = 160$  мм (материал – сосна, ель). Начальный надрез выполнялся только в растягиваемой зоне образца. Длина задаваемой трещины  $a = 4, 10, 18, 26$  мм. Влажность образцов перед началом испытаний была в пределах 8 – 9 %.

В ходе испытаний фиксировались диаграммы нагрузка – деформации, по результатам которых получали нагрузку старта трещины, на основе которой рассчитывали значение критического КИН по следующей формуле

$$K_{IC} = \frac{3F_c L_0}{2t\sqrt{b}} \sqrt{\frac{a_0}{b}} Y, \quad (2)$$

где  $Y$  – К-тарировка для данного типа образцов, принимаемая для древесины равной  $(1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4)$ , как и для изотропных материалов, поскольку, согласно изученной литературе, разница между ее значениями для древесины и изотропных материалов составляет не более 1 % [7, 10].

В ходе исследований нами было проверено влияние на КИН таких факторов, как длина трещины, скорость нагружения и режимы нагружения «жесткий» и «мягкий». Для этого образцы были разделены на серии (каждая серия состояла из 5 образцов):

- К1 и Ц1 – скорость нагружения 0,02 мм/с;
- К2 и Ц2 – скорость нагружения 0,20 мм/с;
- К3 и Ц3 – скорость нагружения 0,40 мм/с;
- Ц4 – скорость нагружения 0,60 мм/с;
- К4 и Ц5 – соотношение трещины и высоты сечения 0,1 (4 мм);
- К5 и Ц6 – соотношение трещины и высоты сечения 0,25 (10 мм);
- К6 и Ц7 – соотношение трещины и высоты сечения 0,45 (18 мм);
- К7 и Ц8 – соотношение трещины и высоты сечения 0,65 (26 мм).

Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Было определено, что режим нагружения не оказывает влияния на полученные результаты, но «жесткий» режим позволяет получить диаграммы с более выраженными участками старта трещины (рис. 2).

## Результаты испытаний балочных образцов на трещиностойкость

Серия	Длина трещины, мм	Скорость нагружения, мм/с	КИН, кПа·м <sup>1/2</sup>
Клееная древесина			
К1	10 (0,25)	0,02	117,616
К2	10 (0,25)	0,2	110,231
К3	10 (0,25)	0,4	132,161
К4	4 (0,1)	0,2	89,982
К5	10 (0,25)	0,2	123,903
К6	18 (0,45)	0,2	144,641
К7	26 (0,65)	0,2	178,012
Цельная древесина			
Ц1	10 (0,25)	0,02	109,4431
Ц2	10 (0,25)	0,2	129,6049
Ц3	10 (0,25)	0,4	123,6388
Ц4	10 (0,25)	0,6	156,1941
Ц5	4 (0,1)	0,2	64,60638
Ц6	10 (0,25)	0,2	112,3527
Ц7	18 (0,45)	0,2	144,1823
Ц8	26 (0,65)	0,2	130,5828



Рис. 2. Диаграмма «нагрузка – деформации» образца К4.3

В ходе эксперимента было установлено, что наиболее приемлемой скоростью нагружения образцов выбранного сечения при рассматриваемом соотношении длины трещины и высоты сечения является скорость 0,2 мм/с.

При испытании образцов на скорости, равной 0,02 мм/с, получают более детальные диаграммы «нагрузка – деформации», однако в этом случае длительность испытаний возрастает многократно – свыше 20 мин. При скорости 0,4 мм/с образец достигает момента разрушения быстрее, чем за 1 мин, что противоречит методике.

Дополнительно была испытана серия образцов из цельной древесины (Ц4) при скорости нагружения 0,6 мм/с, в этом случае происходит достаточно быстрое накопление дефектов в структуре образцов, что отображается на диаграммах в виде значительных скачков нагрузки при постоянном росте деформаций, из-за этого диаграммы становятся менее читаемыми, а в большинстве случаев определение момента старта трещины становится невозможным (рис. 3).

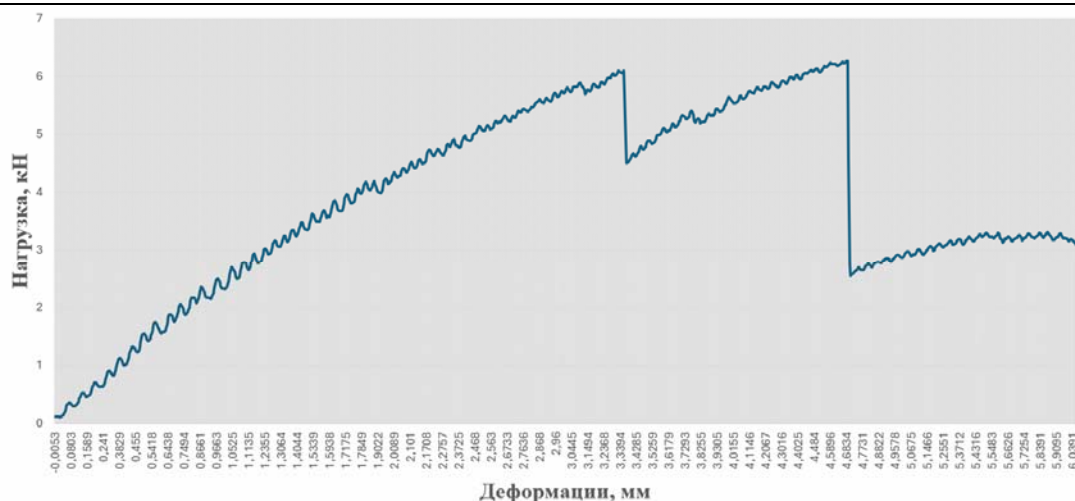


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка – деформации» образца Ц4.4

Следующим этапом стала проверка влияния длины трещины на значение КИН. Согласно данным [8], а также результатам экспериментов [11], длина трещины при испытаниях вдоль волокон в пределах  $a = (0,2 \dots 0,6)h$  не оказывает влияния на трещиностойкость. Однако нами было установлено, что в случае проведения испытаний поперек волокон с увеличением начального надреза происходит увеличение КИН, при этом сама зависимость данных параметров является линейной как для цельной, так и для клееной древесины (рис. 4, 5). Зависимость КИН от длины трещины при испытаниях поперек волокон также подтверждается автором работы [12]. Однако стоит отметить, что при соотношении длины трещины и высоты сечения 0,65 у цельной древесины КИН снижается, а не продолжает расти как у клееной. Видимо, это связано с наличием в клееной древесине клеевых швов, которые имеют большую прочность и трещиностойкость, чем сама древесина, в результате они, удерживая ее, позволяют материалу сопротивляться развитию трещин при большей длине начального надпила.

Эмпирическое уравнение зависимости КИН от длины трещины клееной древесины:

$$K_{IC} = 152,88 \frac{a}{b} + 78,718. \quad (3)$$

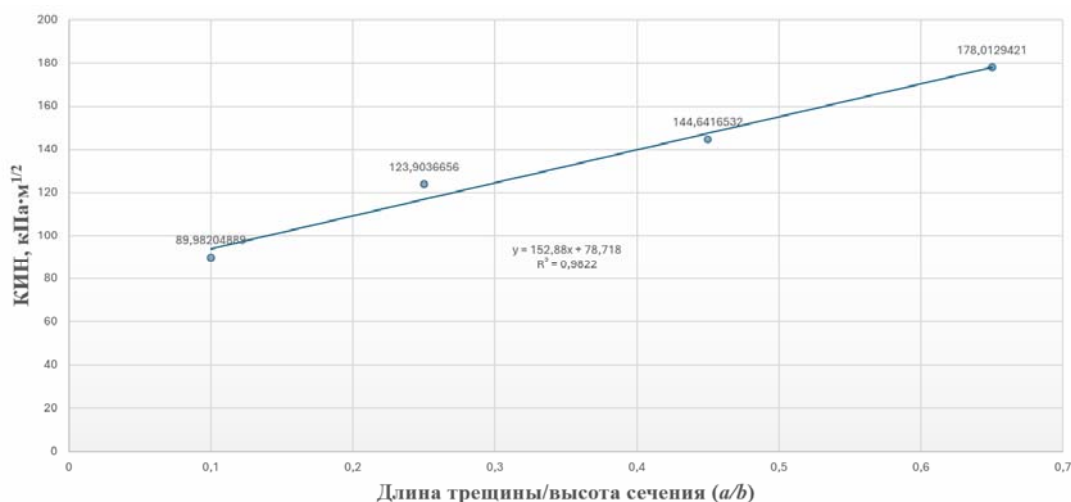


Рис. 4. Зависимость КИН клееной древесины от длины трещины

Эмпирическое уравнение зависимости КИН от длины трещины цельной древесины:

$$K_{IC} = 223,67 \frac{a}{b} + 47,401. \quad (4)$$

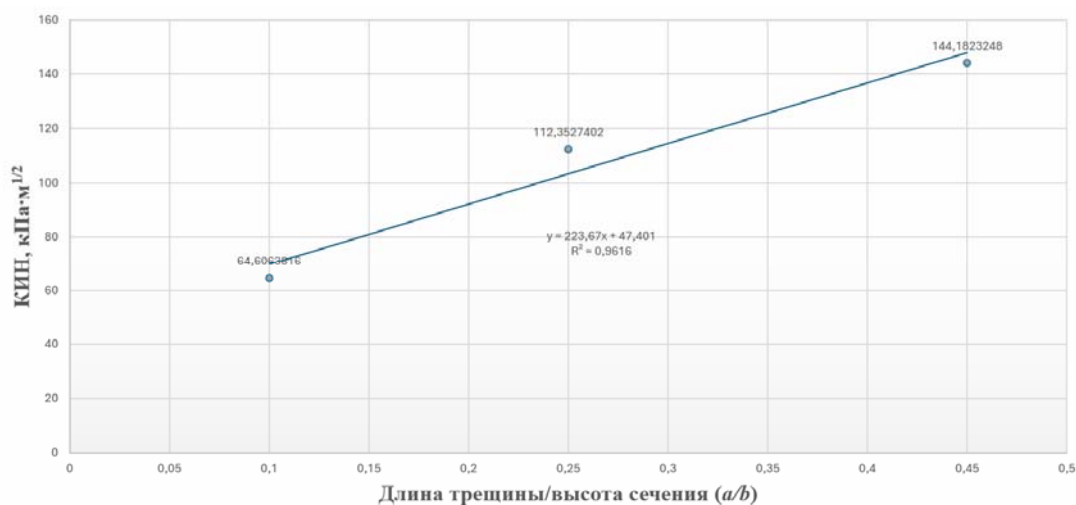


Рис. 5. Зависимость КИН цельной древесины от длины трещины

Также в ходе работы была установлена зависимость между нагрузкой старта трещины  $P_{cr}$ ; КИН  $K_{IC}$  и параметром  $k$ , характеризующим отношение деформации старта трещины к длине трещины. Данные зависимости представлены в виде логарифмических диаграмм для клееной древесины на рис. 6–7. Стоит отметить, что для цельной древесины подобные зависимости установить не удалось. Для данных корреляционных кривых получены эмпирические уравнения. Однако степень точности аппроксимации остается недостаточно удовлетворительной. Это обусловлено недостаточным объемом испытанных образцов для точного выявления рассматриваемых зависимостей. Поэтому данный вопрос требует уточнения. В первом приближении уравнения, описывающие данные зависимости, для клееной древесины имеют вид:

$$P_{cr} = 1,4407 \ln(k) + 1,1029, \quad (5)$$

$$K_{IC} = -39,61 \ln(k) + 221,69. \quad (6)$$

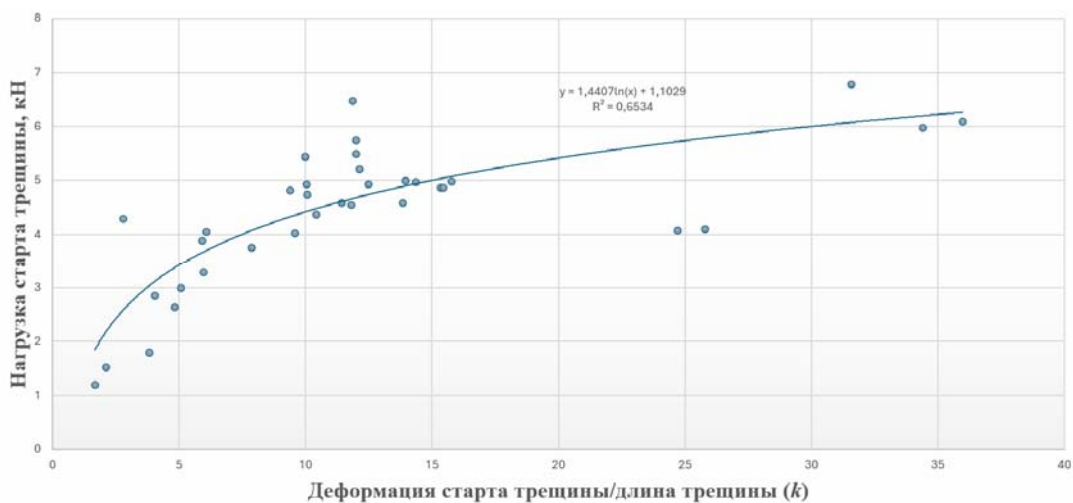
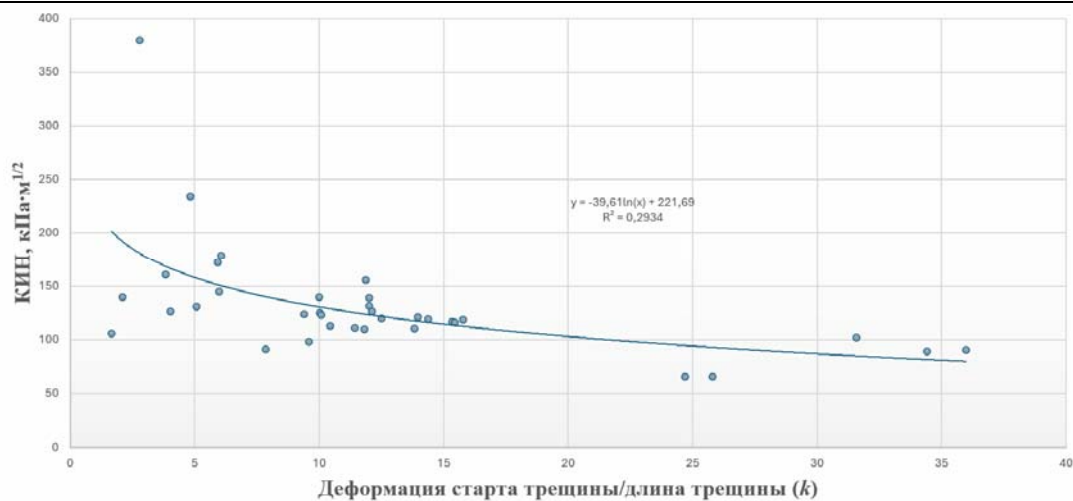


Рис. 6. Зависимость « $P_{cr} - k$ » клееной древесины

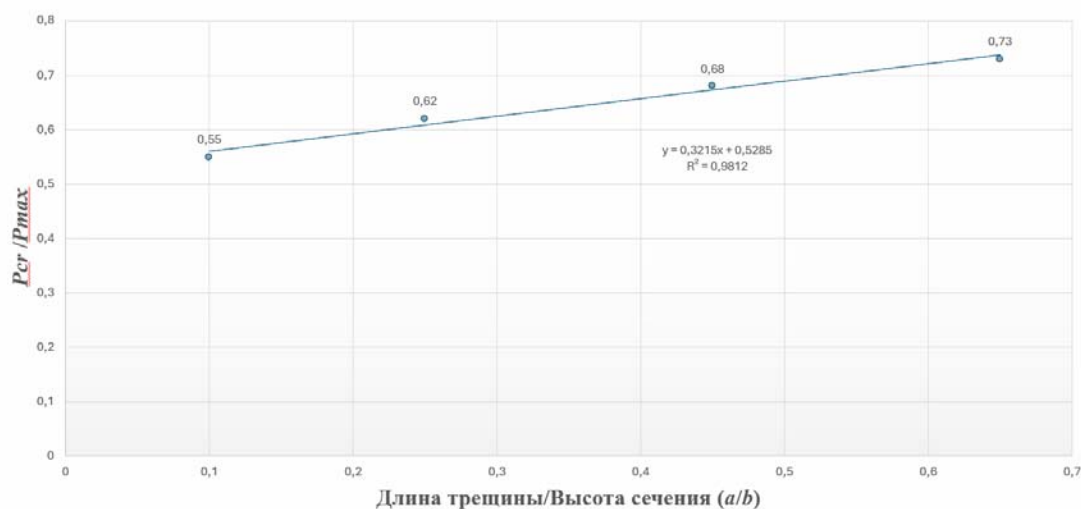

 Рис. 7. Зависимость « $K_{IC} - k$ » клееной древесины

Анализ экспериментальных данных показал, что соотношение нагрузок, соответствующих полной потере образцом несущей способности  $P_{max}$ , и старта трещины  $P_{cr}$  также меняется в зависимости от длины трещины (табл. 2). Графики зависимостей показателей представлены на рис. 8, 9.

Таблица 2

Экспериментальные данные нагрузок

№	Максимальная нагрузка $P_{max}$ , кН	Нагрузка старта трещины $P_{cr}$ , кН	$P_{cr} / P_{max}$	Длина трещины а, мм	КИН, $\text{кПа} \cdot \text{м}^{1/2}$
Цельная древесина					
1	9,727	5,388	0,55	4 (0,1)	89,982
2	8,080	4,900	0,62	10 (0,25)	123,903
3	4,808	3,240	0,68	18 (0,45)	144,641
4	2,545	1,87	0,73	26 (0,65)	178,012
Клееная древесина					
1	9,708	4,070	0,42	4 (0,1)	64,606
2	9,193	4,670	0,50	10 (0,25)	112,352
3	5,443	3,039	0,55	18 (0,45)	144,182
4	2,479	1,572	0,63	26 (0,65)	130,582


 Рис. 8. Зависимость « $P_{cr} / P_{max} - a / b$ » клееной древесины

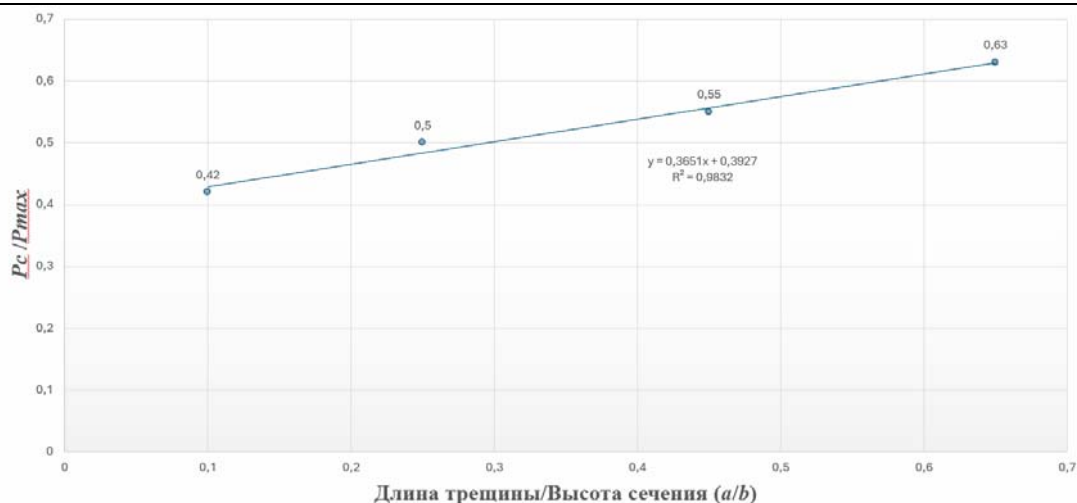


Рис. 9. Зависимость « $P_{cr} / P_{max} - a / b$ » цельной древесины

Уравнение, описывающее рассматриваемую зависимость, клееной древесины имеет вид:

$$\frac{P_{cr}}{P_{max}} = 0,3215 \frac{a}{b} + 0,5285. \quad (7)$$

Уравнение, описывающее рассматриваемую зависимость, цельной древесины:

$$\frac{P_{cr}}{P_{max}} = 0,3651 \frac{a}{b} + 0,3927. \quad (8)$$

Момент старта трещины в цельной древесине происходит несколько раньше, чем в клееной. Это позволяет сделать вывод о том, что при механических воздействиях клееная древесина сопротивляется развитию трещин лучше, чем цельная.

**Выводы.** Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений в случае нормального отрыва  $K_I$  поперек волокон от длины начального пропила в образцах-балках; установлено влияние масштабного эффекта на данный показатель. Полученные результаты позволяют учесть влияние масштабного фактора при составлении общей методики определения КИН конструкций из цельной и клееной древесины.

#### Список литературы

1. Griffith, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1921. – Vol. 221. – P.163–198.
2. Irwin, G.R. Fracture : Handbuch der Physik / G.R. Irwin // Encyclopedia of Physics. – Berlin : Springer Verlag, 1958. – Vol. 3/6. – P. 551–590.
3. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – Москва : Мир, 1954. – 430 с.
4. Скрамтаев, Б.Г. Легкие бетоны / Б.Г. Скрамтаев, М.П. Элинзон. – Москва : Госстройиздат, 1956. – 156.
5. Domel, D.R. Effect of orthotropic material properties on stress intensity factor calculations / D.R. Domel, F.W. Smith // Dept. of Mech. Eng. Colorado State Univ., Ft. Collins, Colo. – 1986. – № 8(3) – P. 253–259.
6. Walsh, P.F. Linear fracture mechanics in orthotropic materials / P.F. Walsh // Eng. Fract. Mech. – 1972. – №4 – P.533–541.



7. Авдяков, Д. В. Контроль трещиностойкости изделий и конструкций из клееной древесины методом статического разрушения образцов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Д.В. Авдяков. – Орел, 2006. – 144 с.
8. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
9. ГОСТ 29167-2021. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Москва : Российский инст. стандартизации, 2022, – 22 с.
10. Найчук, А.Я. Прочность элементов деревянных конструкций в условиях сложного неоднородного напряженного состояния : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.Я. Найчук. – Москва, 2006. – 278 с.
11. Масалов, А.В. Трещиностойкость изгибаемых клееных элементов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Масалов. – Воронеж, 1992. – 25 с.
12. Авдяков, Д.В. Применение методов механики разрушения для оценки стойкости клееной древесины изгибаемых элементов к образованию трещин / Д.В. Авдяков // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы Международных академических чтений, Курск, 18 ноября 2020 года / под редакцией С.И. Меркулова. – Курск : Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2020. – С. 161–167. – EDN HBYCJY.

#### References

1. Griffith, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1921. – Vol. 221. – P.163–198.
2. Irwin, G.R. Fracture : Handbuch der Physik / G.R. Irwin // Encyclopedia of Physics. – Berlin : Springer Verlag, 1958. – Vol. 3/6. – P. 551–590.
3. Nadai, A. Plasticity and destruction of solids / A. Nadai. – Moscow : Mir, 1954. – 430 p.
4. Skramtaev, B.G. Lightweight concrete / B.G. Skramtaev, M.P. Elinzon. – Moscow : Gosstroyizdat, 1956. – 156.
5. Domel, D.R. Effect of orthotropic material properties on stress intensity factor calculations / D.R. Domel, F.W. Smith // Dept. of Mech. Eng. Colorado State Univ., Ft. Collins, Colo. – 1986. – № 8(3) – P. 253–259.
6. Walsh, P.F. Linear fracture mechanics in orthotropic materials / P.F. Walsh // Eng. Fract. Mech. – 1972. – №4 – P.533–541.
7. Avdyakov, D.V. Control of crack resistance of products and structures made of glued timber by the method of static destruction of samples : dis. ... candidate of sciences : 05.11.13 / D.V. Avdyakov/ – Orel, 2006. – 144 p.
8. GOST 25.506–85. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading. – Moscow : Publishing house of standards, 1985. 61 p.
9. GOST 29167-2021. Concretes. Methods for determining crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading. – Moscow : Russian Institute of Standardization, 2022, – 22 p.
10. Naychuk, A.Ya. Strength of wooden structure elements under complex non-uniform stress conditions : dis. ... candidate of sciences : 05.23.01 / A.Ya. Naychuk. – Moscow, 2006. – 278 p.
11. Masalov, A.V. Crack resistance of bending glued elements : Abstract of Dis. ... of Cand. of Sciences / A.V. Masalov. – Voronezh, 1992. – 25 p.
12. Avdyakov, D.V. Application of fracture mechanics methods to assess the resistance of glued wood of bending elements to cracking / D.V. Avdyakov // Safety of the construction stock of Russia. Problems and solutions : Materials of the International Academic Readings, Kursk, November 18, 2020 / Edited by S.I. Merkulov. – Kursk : Closed Joint-Stock Company «University Book», 2020. – P. 161–167. – EDN HBYCJY.

УДК 69.07

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_115

*Тамбовский государственный технический университет**Tambov State Technical University*

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5, тел.+7(953)717-16-44

Russia, 392000, Tambov, Sovetskaya St., 106/5, tel.: +7 (953) 717-16-44

**Николюкин Алексей Николаевич**,  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Конструкции зданий и сооружений»  
E-mail: valax1@yandex.ru**Nikolyukin Aleksey Nikolaevich**,  
Candidate of Sciences, Senior Lecturer,  
Department «Building Structures»  
E-mail: valax1@yandex.ru**Антонов Василий Михайлович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Конструкции зданий  
и сооружений»  
E-mail: antonov280562@mail.ru**Antonov Vasily Mikhailovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Department «Building Structures»  
E-mail: antonov280562@mail.ru**Монастырев Павел Владиславович**,  
доктор технических наук, доцент,  
директор института АрхСиТ,  
член-корреспондент РААСН  
E-mail: monasteryrev68@mail.ru**Monastyrev Pavel Vladislavovich**,  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Director of the Institute of Architecture,  
Construction and Transport (ArchSiT),  
Corresponding Member of the Russian  
Academy of Architecture and Construction  
Sciences (RAACS)  
E-mail: monasteryrev68@mail.ru**Лисовский Владислав Александрович**,  
магистрант кафедры «Конструкции зданий  
и сооружений»  
E-mail: artas525@yandex.ru**Lisovskiy Vladislav Aleksandrovich**,  
Master's Student, Department «Building  
Structures»  
E-mail: artas525@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ

А.Н. Николюкин, В.М. Антонов, П.В. Монастырёв, В.А. Лисовский

Рассматривается актуальность применения машинного обучения и искусственных нейронных сетей для решения задач геотехнического проектирования и прогнозирования. Предлагаемый подход интегрирует искусственные нейронные сети для выявления закономерностей в расчетах грунтовых оснований и результатах полевых испытаний, что позволяет решать прямые и обратные задачи геомеханики без привлечения упрощающих приложений. Теоретической основой работы служит комбинация использования данных мониторинга с принципами механики грунтов в рамках концепции «цифрового двойника» геотехнической системы.

*Ключевые слова:* механика грунтов; проектирование фундаментов; машинное обучение; искусственные нейронные сети; прямые и обратные задачи; цифровой двойник; геотехническое моделирование

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING THE BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES

A.N. Nikolyukin, V.M. Antonov, P.V. Monastyrev, V.A. Lisovskiy

This article examines the relevance of applying machine learning and artificial neural networks to solving the problems of geotechnical design and prediction. The proposed approach integrates artificial neural networks to identify patterns in the analysis of soil foundations and the results of field

tests, enabling the solution of direct and inverse problems in geomechanics without the use of simplifying assumptions. The theoretical basis of the study is the combination of monitoring data with the principles of soil mechanics within the framework of the “digital twin” concept of a geotechnical system.

*Keywords: soil mechanics; foundation design; machine learning; artificial neural networks; direct and inverse problems; digital twin; geotechnical modeling*

**Введение.** В последнее десятилетие наблюдается бурное развитие методов машинного обучения (МО) и их применение в различных областях инженерии, включая строительную механику, механику грунтов и фундаментостроение. Во всем мире наблюдается интерес к использованию искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения инженерных задач, обусловленный как ростом вычислительных возможностей, так и накоплением больших объемов экспериментальных данных и мониторинга за объектами капитального строительства [1]. Традиционные методы расчета оснований и фундаментов зачастую опираются на упрощенные модели и эмпирические зависимости, которые не всегда учитывают всю сложность реальных грунтовых условий. В то же время современные подходы к цифровой трансформации строительной отрасли подразумевают активное внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ), что делает задачу интеграции МО в проектирование актуальной как в РФ, так и в мире.

Следует подчеркнуть, что применение ИНС в геотехнике важно не только из-за технологического тренда, но и по практическим причинам. Геотехнические системы характеризуются высокой неопределенностью и вариабельностью свойств грунтов [2], нелинейным и сложным поведением основания под нагрузкой. Классические методы моделирования не всегда справляются с точным предсказанием таких сложных зависимостей [1]. Исследования последних лет убедительно показывают, что алгоритмы искусственного интеллекта способны выявлять скрытые закономерности при больших объемах разнородных данных и тем самым повышать точность проектирования и прогнозирования. Например, по данным недавней разработки в Пермском политехническом университете, обученная нейросеть сумела спрогнозировать осадку свайного фундамента с точностью, на 15–20 % превышающей традиционные расчетные методики [3]. При этом модель на основе ИНС смогла достичь такой точности, используя меньше данных о прочностных и деформационных свойствах грунтов, чем требуется в классических подходах [3], что наглядно иллюстрирует потенциал ИНС в отечественной практике: нейросети могут не только конкурировать с привычными подходами, но и превосходить их по точности, особенно когда речь идет о задачах с большим числом влияющих факторов.

Следует отметить, что Российское научное сообщество и строительные организации все активнее вовлекаются в глобальный тренд использования МО в строительной механике и механике грунтов. Появляются исследования, посвященные прогнозированию деформаций оснований зданий с помощью нейросетевых моделей [3], а также работы по применению методов глубокого обучения для оценки свойств грунтов и параметров фундаментных конструкций. Таким образом, и в мировой, и в отечественной геотехнике наметилась устойчивая тенденция, а именно цифровизация и интеллектуализация процессов проектирования оснований. Данная работа посвящена развитию этой области, в ней акцентируется внимание на возможностях ИНС при расчетах подземной части зданий – от обработки данных до получения практических инженерных решений.

Современное проектирование оснований зданий и сооружений сталкивается с рядом серьезных вызовов. Во-первых, это неопределенность исходных параметров. Физико-механические свойства грунтов могут значительно варьироваться даже в пределах одной строительной площадки. Инженерно-геологические изыскания предоставляют лишь ограниченный объем информации, которая часто не в полной мере отражает природную изменчивость грунтового массива и во многом зависит от места расположения и количества скважин. Как отмечается в литературе, «неопределенность

данных — обычное явление, обусловленное вариабельностью свойств грунта и условий среды» [4].

Во-вторых, несмотря на развитие численных методов (например конечно-элементного моделирования), остается разрыв между расчетными моделями и фактическим поведением основания. Реальные грунтовые основания ведут себя зачастую сложнее, чем предполагают идеализированные модели: проявляются эффекты ползучести, релаксации, локальные неоднородности, влияние грунтовых вод и др. В проектах высокого уровня ответственности сегодня все шире применяется геотехнический мониторинг — система отслеживания деформаций, порового давления и других параметров основания в ходе строительства и эксплуатации. Цель мониторинга — сверить поведение реального грунтового массива с предсказаниями расчета (рис. 1) [5].

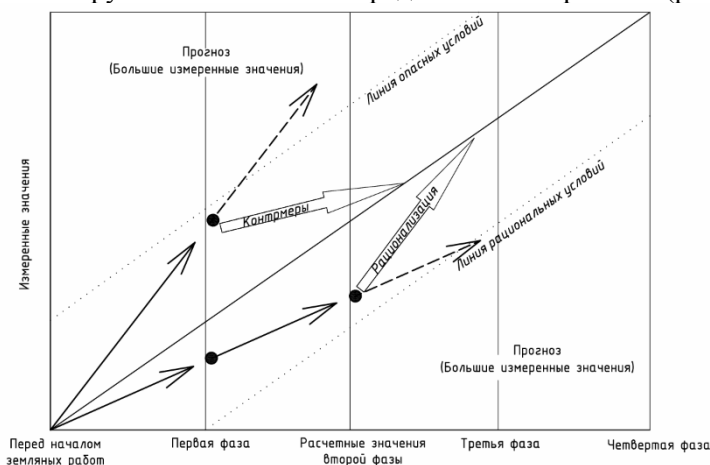


Рис. 1. Концептуальный план мониторинга

Согласно концепции мониторинга за объектом «observational method», «наблюдательного метода» (прямой перевод с английского) (заложенного еще К. Терцаги и развитого Реск в 1969 г.), проектировщик должен корректировать проектные решения, если наблюдаемое поведение грунта выходит за пределы расчетных допущений [5]. Eurocode 7 официально допускает применение наблюдательного метода, когда точное прогнозирование поведения грунта затруднено [5]. Однако на практике реализация такого подхода сопряжена с трудностями: требуется оперативно интерпретировать данные приборного контроля и вносить изменения в проект, что не всегда возможно без надежных методик обратного анализа.

Например, при проектировании свайных фундаментов вначале аналитическими методами определяется несущая способность сваи, конструируется ростверк, а затем результат проверяется статическими и динамическими испытаниями. При значительном расхождении проектировщику приходится корректировать свайное поле и вносить изменения в проектную документацию.

Третья проблема — адаптация расчетных моделей к реальным данным. По сути, речь идет о калибровке модели грунтового основания по результатам натурных наблюдений или испытаний, что является типичной обратной задачей геомеханики: по измеренным осадкам или физико-механическим характеристикам грунта пытаются определить или уточнить параметры модели (модули деформации, коэффициенты ползучести, прочностные характеристики и т.п.). Такая задача, как будет обсуждаться ниже, является некорректной в смысле математической постановки — небольшие погрешности или «шумы» в данных могут приводить к значительным ошибкам в определяемых параметрах [6]. Тем не менее потребность в адаптации моделей высока: необходимо стремиться учесть реальные грунтовые условия, отличающиеся от принятых при расчете.

Современное состояние проектирования фундаментов можно охарактеризовать как переходное. С одной стороны, сохраняется традиционный подход, основанный на детерминированных расчетах с запасом прочности (используются эмпирические

коэффициенты надежности, расчетные схемы по нормативам и т.п.). С другой стороны, все чаще привлекаются данные мониторинга и результаты статических или динамических нагрузочных испытаний, чтобы *уточнить* расчеты. Возникает потребность в инструментах, способных оперативно интегрировать данные в модель. Именно здесь и могут себя проявить методы машинного обучения. Например, уже реализуются первые прототипы цифровых двойников – компьютерных моделей, которые в реальном времени получают данные датчиков (мессдоз, клинометров, тензометров) и корректируют прогноз осадки или несущей способности сооружения [4, 7, 8]. Такие цифровые модели позволяют совмещать данные мониторинга с расчетными зависимостями, создавая более надежную основу для принятия инженерных решений в ходе строительства или эксплуатации объекта.

Таким образом, современное проектирование оснований характеризуется одновременным использованием расчетных моделей и натурных данных. Однако методы их совмещения пока недостаточно развиты. Возникает научная и практическая задача – создать подходы, которые учитывали бы неопределенность исходных грунтовых параметров, эффективно использовали бы данные мониторинга и обеспечивали бы адаптацию моделей к реальности. Решение этой задачи необходимо для повышения надежности и экономичности проектных решений в геотехнике.

*Исторические предпосылки: отечественные и зарубежные исследования.* Развитие методов расчета фундаментов и оснований имеет богатую историю, заложившую фундамент для современных подходов с использованием ИНС. Важнейшую роль сыграли как отечественные научные школы, так и зарубежные исследователи.

Голампеза Месри (США) известен прежде всего своими трудами по компрессии и консолидации мягких глин. Он ввел понятие «*четвертого закона грунто-механики*», связывающего параметры сжатия грунтов [14]. Месри показал универсальные зависимости между коэффициентом вторичной консолидации  $C_\alpha$  и индексом сжимаемости  $C_c$  для широкого класса глинистых грунтов, тем самым дал инженерам простой инструмент оценки длительных осадок.

Обученная на базе данных статических зондирований модель классификации способна распознавать, где песок, где глина, по комбинированным показателям  $q_c$ ,  $R_f$ , и подобно диаграммам Робертсона, но в нелинейной постановке.

Juang и Chen (1999) применили ANN для оценки вероятности разжижения грунта по данным СРТ: на вход подавались значения  $q_c$  и относительного трения, на выходе – бинарный признак «разжижение возникает/не возникает» [15]. Точность такой модели превысила точность классического детерминистического критерия разжижения.

Кроме того, ИНС используются для обработки геопространственных данных: на основании разрозненных точек исследований (скважин) нейронные сети способны построить 3D-модель грунтового массива. Существуют решения на базе сверточных и геостатистических нейросетей, которые, получив координаты и данные скважин, восстанавливают распределение свойств внутри объема грунта (альтернатива интерполяции типа «кригинг») [15]. Это помогает более точно оценить вариации свойств грунтов на площадке.

Важно подчеркнуть, что исторические исследования – как отечественные, так и зарубежные – обеспечили нас богатым эмпирическим материалом. Натурные наблюдения за фундаментами (например, данные по осадкам зданий, испытания опытных свай, результаты штамповых испытаний), а также многочисленные лабораторные эксперименты образуют обширные базы данных. Ранее эти данные служили для вывода эмпирических формул и калибровки коэффициентов в моделях. Теперь же, в эпоху машинного обучения, они приобретают новую ценность – как обучающие выборки для МО-моделей. Например, данные многолетнего мониторинга осадок, обобщенные Месри. Г., могут лечь в основу обучающего набора для нейросети, прогнозирующей длительную осадку. А классические решения В.В. Леденева, Н.Г. Poulos и М.Ф. Randolph следует использовать для генерации синтетических данных

(эталонных решений), на которых можно обучать и тестировать физически информированные нейросети.

Таким образом, наследие исследователей прошлого века – это не только сформулированные теории и методы, но и накопленные знания о поведении фундаментов. При выполнении исследований авторы опирались на эти исторические предпосылки, стремясь объединить классические идеи механики грунтов с современными инструментами искусственного интеллекта.

**Прямые и обратные задачи в строительной механике (по Адамару).** В строительной механике (и в механике грунтов, в частности) под прямой задачей обычно понимают расчёт поведения системы при заданных входных параметрах. Например, расчет осадки фундамента при заданных свойствах грунта, геометрии и нагрузке – это прямая задача.

Пусть вектор

$$\theta = \{E, \nu, \gamma, c, \varphi, \dots\}, \quad (1)$$

где  $\theta$  содержит физико-механические характеристики грунта ( $E$  – модуль деформации;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma$  – удельный вес грунта;  $c$  – сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения), а вектор

$$p = \{P, B, L, d, \dots\} \quad (2)$$

– геометрию и нагрузки (вертикальное давление  $P$ , размеры фундамента  $B \times L$ , глубина заложения  $d$  и т.п.). Тогда математическая постановка прямой задачи записывается операторным равенством

$$u = f(\theta, p), \quad (3)$$

где  $u$  – вектор отклика (осадка  $s$ , распределение напряжений  $\sigma_{ij}$ , коэффициент запаса и др.);  $f$  – оператор, задаваемый, как правило, системой дифференциальных уравнений равновесия с граничными условиями.

Обратная задача, напротив, предполагает определение неизвестных параметров модели по наблюдаемому отклику системы – например, идентификация коэффициента уплотнения грунта по измеренной осадке здания или определение несущей способности сваи по результатам испытаний.

Обратная задача ставится с точностью «наоборот»: требуется восстановить неизвестные параметры  $\theta$  по измеренному отклику  $\hat{u}$ :

$$\theta = G(\hat{u}, p), \quad (4)$$

причём явный вид оператора  $G$  неизвестен и обычно ищется численно.

Жак Адамар в 1902 г. ввел понятие корректно и некорректно поставленных задач. Корректная (well-posed) задача, по Адамару, должна удовлетворять трем условиям:

- 1\*) у задачи существует решение,
- 2\*) решение единственно,
- 3\*) решение устойчиво зависит от начальных данных.

Если хотя бы одно из этих условий нарушается – задача называется некорректной (ill-posed) [9]. Классическим примером некорректно поставленной задачи является большинство обратных задач механики: как правило, их решение не единственно и/или неустойчиво.

Следует подчеркнуть, что прямые задачи геотехники на практике тоже могут приобретать черты некорректности, если учитывать неопределенность исходных параметров. Формально уравнения упругопластического расчета фундамента при заданных параметрах грунта имеют единственное решение, но проблема в том, что параметры грунта не заданы точно – они являются случайными или размытыми величинами. Небольшое изменение модуля деформации или угла внутреннего трения

может привести к непропорционально большому изменению осадки в расчетной модели (нарушается устойчивость решения относительно исходных данных). Таким образом, прямой расчет основания с «номинальными» значениями параметров может быть неустойчив: при варьировании параметров в пределах ошибки их определения результаты расчета могут существенно колебаться. Именно поэтому в геотехнике широко применяются техники резервирования и учета разброса параметров – например, расчеты по наихудшим сценариям, применение пониженных расчетных сопротивлений и повышенных нагрузок (метод частных коэффициентов надежности) и т.п., что, по сути, компенсирует эффект некорректности.

Даже формально прямое уравнение упругопластического расчёта единственно, но параметры  $\theta$  известны лишь приблизительно. Пусть модуль  $E$  подвержен погрешности  $\Delta E$ , тогда относительная вариация осадки из (2):

$$\frac{\Delta s}{s} = -\frac{\Delta E}{E}, \quad (5)$$

а чувствительность

$$\left| \frac{\partial s}{\partial E} \right| = \frac{s}{E}, \quad (6)$$

показывает, что малые ошибки в  $E$  приводят к сопоставимым (а иногда и большим) ошибкам в  $s$ ; следовательно, условие устойчивости (3\*) нарушается.

Обратные же задачи геотехники заведомо относятся к некорректным. Определение параметров грунта по ограниченному числу наблюдений многозначно – разные комбинации характеристик грунта могут давать сходное поведение модели. Например, при анализе осадки фундамента увеличение модуля деформации может быть скомпенсировано увеличением расчетной толщины сжимаемой толщи – и оба варианта дадут похожую кривую осадки во времени, хотя физически соответствуют разным состояниям основания. Кроме того, обратные задачи чувствительны к шумам измерений: «малые ошибки в данных могут приводить к большим ошибкам в решении» [9]. В лабораторных и полевых испытаниях всегда присутствует погрешность, и попытка точно подогнать модель под такие данные может привести к переобучению – модели начнут описывать шум (разброс), а не реальную зависимость.

Еще Адамар отмечал, что некорректные задачи «не достойны внимания ученых», подразумевая, что с физической точки зрения постановка должна быть изменена, чтобы восстановить корректность [10]. Однако в инженерной практике нам неизбежно приходится сталкиваться с некорректными задачами – особенно при обработке экспериментальных данных. Поэтому были разработаны специальные методы решения некорректных задач, в частности методы регуляризации (тихоновская регуляризация и др.) [9, 11]. Суть регуляризации состоит в добавлении дополнительной априорной информации или ограничений, чтобы обеспечить единственность и устойчивость решения.

Для (3) вариации измерений  $\delta \hat{u}$  масштабируются *обратно*:

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{\Delta \hat{s}}{\hat{s}}, \quad \left| \frac{\partial E}{\partial \hat{s}} \right| = \frac{E}{\hat{s}}, \quad (7)$$

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \left\{ \underbrace{|\hat{u} - f(\theta, p)|^2}_{\mathcal{L}_{\text{данные}}} + \alpha \underbrace{|L\theta|^2}_{\mathcal{L}_{\text{рег}}} \right\}; \quad (8)$$

- $\theta^*$  – вектор искоемых параметров модели грунта;
- $\hat{u}$  – измеренный отклик системы (например, осадка, поровое давление);



- $f(\theta, p)$  – модельный отклик, зависящий от параметров  $\theta$  и условий задачи  $p$ ;
- $\mathcal{L}_{\text{данные}} = |\hat{u} - F(\theta, p)|^2$  – функция ошибки (потерь) по данным (показывает, насколько расчёт по модели  $f$  соответствует измеренным значениям  $\hat{u}$ ; минимизация означает попытку аппроксимировать наблюдения);
- $L$  – линейный оператор регуляризации (например, единичный оператор  $I$  или оператор дискретного градиента);
- $\mathcal{L}_{\text{рег}} = |L\theta|^2$  – регуляризатор, ограничивающий рост, колебания или нереальность параметров (вводит априорные ограничения на параметры  $\theta$ , чтобы избежать переобучения и неустойчивости; например: если  $L=I$ , то штрафуются величины самих параметров; если  $L$  – дискретный градиент, то штрафуются резкость изменения параметров по глубине (для стратифицированных оснований));
- $\alpha > 0$  – коэффициент регуляризации, управляющий балансом между аппроксимацией данных и гладкостью/стабильностью решения (балансирует между точностью подгонки и стабильностью решения; при малом  $\alpha$  модель может переобучаться; при слишком большом  $\alpha$  – теряется соответствие данным).

Некорректность затрагивает прямые вычисления (при неопределённых  $\theta$ ) и обратные идентификационные задачи. Регуляризация частично решает проблему, но требует выбора  $\alpha$  и модели  $L$ . Методы машинного обучения и нейросетей предлагают альтернативный инструмент: они способны аппроксимировать оператора  $G$  или подменять прямой расчёт  $f$ , одновременно выполняя *встроенную регуляризацию* через обучение на больших датасетах и учёт априорных знаний (Physics-Informed NN, байесовские NN). Таким образом, МО предоставляет естественный путь к решению некорректно поставленных задач строительной механики грунтов в условиях неопределённости исходных данных.

В контексте проектирования фундаментов регуляризация может принимать вид, например, ограничения диапазонов изменения параметров грунта при решении обратной задачи, введения сглаживающих функций для распределения свойств по глубине и т.п.

Проблема некорректности пронизывает постановку как прямых расчетов оснований (в условиях неопределенности параметров), так и обратных задач идентификации параметров по наблюдениям, что подразумевает необходимость новых подходов, способных работать в условиях неопределенности, многозначности решений и чувствительности к шумам (разбросу данных). Методы машинного обучения, включая нейросетевые модели, предоставляющие средства для аппроксимации сложных зависимостей и встроенной регуляризации на основе данных, могут рассматриваться как часть инструментария для решения некорректно поставленных задач.

**Традиционные методы решения расчетных задач и их ограничения.** Прежде чем перейти к обсуждению нейросетевых подходов, рассмотрим кратко существующие традиционные методы решения прямых и обратных задач в геотехнике, а также их ограничения.

*1. Метод конечных элементов и модельное обновление (FEM/FEMU).* Для прямых задач (расчетов напряженно-деформированного состояния оснований) сегодня стандартом де-факто является метод конечных элементов (МКЭ). Современные программные комплексы (PLAXIS, ANSYS, Midas GTS NX, SIGMA/W и др.) позволяют моделировать сложные грунтовые основания с учетом многослойности, нелинейности грунта, ползучести, фильтрации и др. Однако результат МКЭ-моделирования напрямую зависит от точности исходных параметров – модуля деформации, угла внутреннего трения, сцепления и пр. В реальности эти параметры известны приближенно, поэтому калибровка модели имеет решающее значение. Процесс корректировки параметров МКЭ по натурным данным называют Finite Element Model Updating (FEMU) – обновлением модели конечных элементов, что, по существу, является решением обратной задачи: подгонка параметров так, чтобы расчетные осадки совпали с измеренными. Главная проблема FEMU – неединственность решения и высокая

вычислительная затратность. Разные сочетания параметров могут давать сходный результат, особенно если данные измерений ограничены. Кроме того, процедура оптимизации (например, методом проб и ошибок, градиентными методами или методом генетических алгоритмов) требует множества прогонов модели, что при детальной 3D-схеме крайне ресурсоемко. В итоге FEMU на практике применяется точечно (например для отдельного испытания), но не может оперативно работать в режиме реального времени для сложного объекта. Ещё один нюанс: классические алгоритмы оптимизации не гарантируют физически верного решения – модель может подстроиться под данные, но при этом параметры выйдут за разумные пределы. В этом смысле традиционному подходу не хватает встроенных механизмов учета априорных знаний (например, о диапазонах параметров), что, как будет показано, присуще байесовским и физически информированным подходам.

Для прямых задач (расчёт НДС оснований) стандартом де-факто является МКЭ. Современные комплексы (PLAXIS, ANSYS, Midas GTS NX, SIGMA/W и др.) учитывают многослойность, нелинейность, фильтрацию, ползучесть. В прикладном геотехническом моделировании широко применяются Hardening Soil (HS) и её модификация Hardening Soil Small-Strain (HSS). Модель HS – упругопластическая с зависящими от уровня эффективных напряжений модулями деформации: при трёхосном сжатии  $E_{50}$ , в одометрии  $E_{oed}$  и при разгрузке/перезагрузке  $E_{ur}$ ; типично они задаются степенной зависимостью вида  $E = E^{ref} (\sigma' / p_{ref})^m$ , что позволяет корректно описывать нелинейное уплотнение и дилатацию (через  $\psi$ ). Расширение HSS вводит повышенную жёсткость при малых деформациях  $G_0 = \rho V_s^2$  и её деградацию с ростом сдвиговой деформации  $\gamma$  (обычно гипербола Хардина – Дрневича). Практическая пригодность HS/HSS зависит от калибровки параметров по трёхосным и одометрическим тестам, данным CPT/SPT и, при HSS, по  $V_s$ ; при этом важно соблюдение физически осмысленных соотношений  $E_{ur} > E_{50} \geq E_{oed} > 0$  и разумных диапазонов  $m$ ,  $\psi$ .

Однако результат МКЭ-моделирования по-прежнему критически зависит от точности исходных параметров, которые в реальности известны приближённо; поэтому калибровка модели имеет решающее значение. Процесс корректировки параметров по натурным данным называют Finite Element Model Updating (FEMU) – по существу, решается обратная задача: параметры подбираются так, чтобы расчётный отклик совпал с измеренным. Главные ограничения FEMU неизменны: неединственность решения при дефиците наблюдений; высокая вычислительная трудоёмкость многократных прогонов 2D/3D-схем; риск «нефизичных» параметров при чисто числовой подгонке. Поэтому на практике всё чаще применяют априорные ограничения и/или байесовские подходы, а также суррогатные модели (МО), ускоряющие обратный анализ.

2. *Статистические методы и надёжностной анализ.* Ещё одним подходом к решению задач геомеханики является использование статистики и теории вероятностей. Прямые задачи могут решаться методами *анализа надёжности* (reliability analysis), где выходная величина (например, предельной нагрузки на фундамент) рассматривается как случайная функция от случайных же входных параметров. Методы уровня (*First/Second Order Reliability Method – FORM/SORM*) и статистические моделирования Монте-Карло позволяют оценивать вероятность отказа, распределение осадок и др. Однако эти методы не дают единственного «детерминированного» решения, требуемого в проектировании, а оперируют вероятностями. На практике их используют для обоснования коэффициентов надёжности в нормах или для оценки риска, но не для повседневного расчета каждого фундамента. Что касается обратных задач, то статистический подход реализуется в байесовском оценивании параметров: исходные параметры рассматриваются как случайные величины с априорным распределением, затем на основе наблюдений выводится апостериорное распределение (например, через методы МСМС – марковских цепей Монте-Карло). Достоинство байесовского подхода – в получении не просто оценок, а доверительных интервалов для параметров, что важно в условиях неопределённости. Более того,

байесовские методы позволяют естественным образом регуляризовать решение обратной задачи, избегая нереалистичных значений параметров за счет априорной информации. Однако высокая вычислительная сложность таких методов долгое время ограничивала их применение. Сегодня, с развитием вычислительной техники, байесовские подходы вновь набирают популярность, в том числе в связке с МО (байесовские нейронные сети, вероятностные графовые модели и т.п.) [4].

3. *Классические эмпирические формулы.* В основе практического фундаментостроения традиционно лежат проверенные эмпирические зависимости. Для прямых задач это, например, формулы для расчетной нагрузки по несущей способности (Терцаги, Мейергоф, В. В. Соколовский и др.), формулы для осадки (метод консолидации от Оденбрехта – Миндлина, эмпирические формулы Шмертмана для относительной просадки и др.), корреляционные связи (например, между показателями испытаний СРТ и несущей способностью свай). Данные методы просты и быстры в применении, но их точность ограничена условиями, в которых они были получены. Как правило, эмпирические формулы содержат большие поправочные коэффициенты или заложены на стороне безопасности. Исследования показывают, что разные методики могут давать сильно разнящиеся результаты. Например, в одном из обзоров по осадкам мелких фундаментов в пьемонтской зоне США было показано, что почти все классические методы систематически переоценивают осадки – отношение рассчитанной осадки к измеренной  $S_c / S_m$  превышало 1,0 (т.е. осадка по расчету больше фактической) в большинстве случаев [12]. Разброс результатов при этом был очень велик – коэффициент вариации достигал 0,7–1,8 для разных методов [12], что свидетельствует об ограниченной предсказательной способности таких эмпирических подходов: они надежны лишь в пределах тех грунтовых условий, на которых были разработаны. При выходе за эти рамки точность снижается.

Еще более ограничены классические методы в обратных задачах. По сути, единственный широко применяемый инструмент обратного характера – это корреляционные зависимости (напрямую не решающие задачу идентификации, но позволяющие оценить параметр по косвенному индикатору). Например, по результатам стандартного пенетрационного теста (SPT) или статического зондирования (CPT) эмпирическими формулами оценивают угол внутреннего трения или модуль деформации грунта. Однако точность таких оценок невысока, а разброс огромен. Поэтому в нормах часто заложены дополнительные коэффициенты надежности при использовании корреляций.

В итоге традиционные подходы страдают либо недостатком универсальности, либо вычислительной непрактичностью, либо неоднозначностью результатов, что и побуждает исследователей искать новые методы, которые могли бы преодолеть указанные ограничения. Ниже приводится краткое резюме ограничений традиционных методов:

- *Методы МКЭ без МО:* требуют точных входных данных, неустойчивы к неопределенности параметров; калибровка параметров – отдельная сложная задача.
- *Статистические и вероятностные методы:* дают оценку неопределенности, но сами по себе не решают детерминированной задачи; сложны в применении без спецподготовки.
- *Эмпирические формулы и корреляции:* просты, но не учитывают совокупное влияние множества факторов, имеют узкую область применимости.

Из вышеизложенного следует необходимость разработки новых подходов, способных использовать обширный массив накопленных данных, учитывать априорные знания (физические закономерности) и формировать однозначные решения с оценкой их достоверности.

Одним из возможных направлений решения этой задачи являются современные нейросетевые модели, особенно если они снабжены физической интерпретацией и вероятностными механизмами (рис. 2).

Потенциал нейросетевых моделей: прогнозирование, идентификация, оптимизация, цифровые двойники. Методы искусственных нейронных сетей открывают новые возможности в решении как прямых, так и обратных задач механики грунтов. Их

ключевое преимущество – способность приближенно воспроизводить любые сложные нелинейные зависимости по данным, минуя явное формулирование уравнений. Рассмотрим, какие задачи в геотехнике потенциально могут решаться с помощью ИНС и связанных подходов и в чем их преимущество перед традиционными методами.

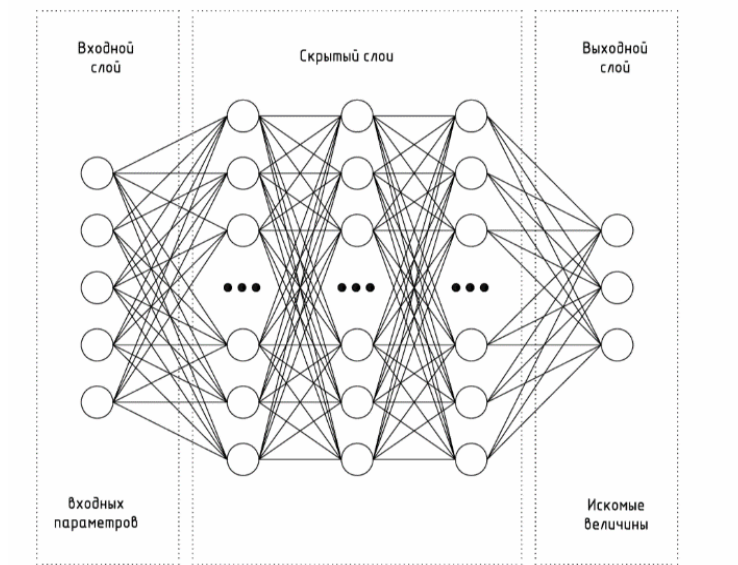


Рис. 2. Схема типичной многослойной нейронной сети прямого распространения, состоящей из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев (нейроны  $j$ ) и выходного слоя [16]

Прогнозирование (forward prediction). Нейросетевые модели могут выступать в роли *аппроксиматоров* прямых задач, т.е. напрямую предсказывать отклик системы по заданным входным параметрам. В контексте геотехники это может быть прогноз осадки по заданным параметрам грунта и нагрузки, оценка несущей способности сваи по геологическим данным и размерам сваи, прогноз развития порового давления во времени и др. Уже имеются успешные примеры: например, нейронные сети применялись для прогнозирования осадки грунтового основания на основе результатов статического зондирования [3]. В обзорах отмечается, что ИНС эффективно справляются с задачами *предсказания свойств грунтов и поведения сооружений*, где традиционные модели испытывают трудности из-за нелинейности системы [1]. ИНС способны учитывать множество входных параметров (факторов) одновременно и «обходить слабости традиционных моделей в описании сложных взаимосвязей между параметрами» [1]. В результате можно получить более точный прогноз, чем по простой эмпирической формуле, что подтверждается практикой (см. пример Пермского политеха выше). Кроме того, скорость работы обученной нейросети очень высокая: один раз натренированная модель выдает результат практически мгновенно, что открывает путь к созданию прикладных сервисов.

Идентификация и обратные задачи. Второе направление – применение ИНС для решения обратных задач, то есть для идентификации параметров. Здесь возможно несколько направлений. Первое – использовать нейросеть для решения обратных задач: например, обучить ее подбирать оптимальные параметры сваи (вид, размеры) по данным геологических изысканий и внешним нагрузкам на фундамент. Фактически сеть будет аппроксимировать обратную зависимость.

Существуют работы, где таким путем определяли характеристики грунтов по результатам тестов (например, прочность по результатам трехосного сжатия, коэффициент фильтрации по кривой консолидации и т.п.) [1].

Однако более перспективным является байесовский, или модельно-ориентированный, подход: байесовские нейронные сети позволяют одновременно получать распределение параметров с учетом неопределенности данных [4]. В задачах механики грунтов это крайне актуально – вместо одного «детерминированного» модуля деформации можно получить вероятностное распределение, учитывающее погрешности

полевых измерений и вариации грунта. Вторым направлением является интеграция нейросетей с численными моделями: например, использование сверточных сетей для ускорения решения обратной задачи в рамках фильтра Калмана или других фильтров для идентификации параметров по последовательным измерениям. Здесь нейросеть играет роль аппроксиматора оператора, что значительно ускоряет расчет при многократных итерациях обновления модели.

Отдельно стоит отметить новейший класс подходов – Physics-Informed Neural Networks (PINNs), или физически информированные нейронные сети. Данные нейросети, обучаемые с учетом того, что их выходные функции удовлетворяют заданным дифференциальным уравнениям (например уравнениям фильтрации или упругости), можно применять как к прямым, так и к обратным задачам, включая идентификацию параметров уравнений. Преимущество PINNs – они позволяют учитывать физические законы на этапе обучения, благодаря чему решение, во-первых, удовлетворяет граничным и исходным условиям, а во-вторых, требует меньше экспериментальных данных для обучения [4]. В условиях ограниченного количества данных, что типично для геотехники, PINNs показали себя многообещающе [4]. Например, уже есть работы, где PINN решает обратную задачу консолидации – идентифицирует коэффициент фильтрации грунта по данным осадки во времени [4]. PINNs как бы совмещают сильные стороны МКЭ (учет фундаментальных уравнений) и МО (универсальная аппроксимация): они гарантируют *физическую правдоподобность* получаемого решения. Однако PINNs – не панацея: отмечены сложности обучения при сильной нелинейности моделей и многомерности областей [4]. Тем не менее развитие PINNs идет быстрыми темпами, и ожидается, что в ближайшее время они найдут широкое применение в задачах механики грунтов.

**Оптимизация и разработка решений.** Нейросетевые модели могут быть встроены в оптимизационные процедуры. Например, обученная surrogate-модель на базе ИНС (т.е. быстрая аппроксимация расчетной модели) может использоваться в алгоритме оптимизации для подбора оптимальных размеров фундамента, глубины заложения и др. При этом число вызовов тяжелой расчетной модели существенно сокращается – основную нагрузку берет на себя быстрый surrogate. Еще вариант – генеративные модели (типа вариативных автоэнкодеров или генеративных состязательных сетей), которые можно обучить генерировать возможные различные геологические условия по ограниченным данным разведки, что тоже своего рода решение обратной геотехнической задачи (восстановление недостающей информации о грунте). В целом методы МО могут расширить инструментарий оптимизационного проектирования, позволяя исследовать пространство решений гораздо быстрее, чем brute-force перебор с классическим расчетом.

**Цифровые двойники и мониторинг.** Как отмечалось, цифровой двойник геотехнической системы – это связка расчетной модели с данными датчиков в реальном времени. Нейросети могут выполнять роль эксперта для цифрового двойника. Например, можно построить нейросетевую модель, которая непрерывно обновляет прогноз осадки /накопления деформаций на основании поступающих данных мониторинга (например, многоточечных измерений осадки или крена конструкции). В литературе описаны подходы, где данные сейсмометров и датчиков деформации «скармливаются» рекуррентной нейросети или гибридной модели для прогнозирования состояния склонов, плотин и других сооружений в режиме реального времени [4]. Для фундаментов можно представить себе систему, где на этапе сооружения фундамента нейросеть, обученная на массиве типовых ситуаций, по первым замерам осадок предсказывает будущую кривую осадки и предупреждает о возможном превышении нормативных пределов. Digital twin, усиленный ИНС, способен не только фиксировать отклонения, но и рекомендовать управляющие воздействия (например необходимость усиления основания, корректировки нагрузки и т.п.), основываясь на знании, вынесенном из данных предыдущих проектов. Хотя концепция цифрового двойника только набирает популярность в геотехнике [4], ее потенциал огромен: сочетание физической модели (например уравнений фильтрации и консолидации) с обучаемыми

компонентами (нейросети, обновляющие параметры по данным) обещает качественно новый уровень управления безопасностью сооружений.

Преимущества нейросетевых и гибридных подходов можно суммировать следующим образом:

- *Учет нелинейности и множества факторов:* нейросети легко учитывают нелинейные эффекты и взаимодействие множества входных переменных, что традиционно сложно для аналитических моделей [1].

- *Способность учиться на данных:* модели МО становятся точнее по мере накопления данных; они могут обновляться при появлении новой информации (онлайн-обучение), что идеально подходит для адаптивных моделей оснований.

- *Высокая скорость вывода:* после обучения нейросеть рассчитывает отклик практически мгновенно, что важно для оперативных задач (например, в мониторинге или при многократных оптимизационных запусках).

- *Интеграция с физическими законами:* современные PINN и теоретически обоснованные нейросети (theory-guided networks) позволяют встроить знание уравнений механики грунтов прямо в структуру модели [4], что уменьшает требование к объему обучающих данных и повышает надежность экстраполяции за пределы обученной выборки.

- *Оценка неопределенности:* байесовские нейросети и методы ансамблей дают возможность оценивать доверие к прогнозу. Для инженера важно знать не только одно число осадки, но и диапазон, в котором она может находиться с определенной вероятностью [4].

- *Гибридизация методов:* нейросети могут работать совместно с традиционными методами (например, улучшать сходимость МКЭ расчетов, фильтровать шумы измерений, заполнять пробелы в данных). Такая гибридная схема объединяет лучшее от двух миров – надежность физики и гибкость данных [4].

Конечно, применение ИНС в геотехнике не лишено сложностей: требуется формировать обучающие выборки, избегать переобучения (чрезмерной подгонки под ограниченные данные), интерпретировать «черный ящик» модели в физических терминах. Однако современные исследования активно адресуют эти вопросы – развивается объяснимый ИИ, вводятся интерпретируемые параметры в нейросети, применяются методы регуляризации и привязки к физическим реалиям, чтобы результаты были приемлемы для инженера-практика [4].

**Выводы.** Предложенный теоретический подход демонстрирует высокую эффективность применения ИНС в задачах механики грунтов и фундаментов. Искусственные нейронные сети способны выявлять сложные зависимости в поведении грунтов без необходимости априорного задания формул или упрощающих допущений [13], что выгодно отличает их от традиционных методов и позволяет существенно повысить точность прогнозирования поведения грунтового основания и обоснованность инженерных решений [17]. Обученные на достаточном объеме данных модели ИНС способны адаптироваться к местным инженерно-геологическим условиям и решать задачи прогнозирования несущей способности и осадок с точностью, недостижимой ранее.

Разработка подобного подхода открывает новые перспективы для геотехники. В частности, закладываются предпосылки создания цифровых двойников геотехнических систем, при которых вычислительная модель основания постоянно уточняется в реальном времени на основе данных мониторинга [17]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию методов МО с физическими моделями механики грунтов, что позволит учесть фундаментальные закономерности в нейросетевых алгоритмах. Кроме того, важно уделить внимание вопросам интерпретируемости моделей и надёжной верификации результатов, чтобы обеспечить доверие к новым интеллектуальным технологиям и их успешное внедрение в инженерную практику.

## Список литературы

1. Shao, W. The application of machine learning techniques in geotechnical engineering: a review and comparison / W. Shao, W. Yue, Y. Zhang, T. Zhou, Y. Zhang, Y. Dang, H. Wang, X. Feng, Z. Chao // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11, Iss. 18.
2. Леденёв, В.В. Расчётные модели для проектирования конструкций зданий / В.В. Леденёв, П.В. Монастырёв, Г.М. Куликов, С.В. Плотникова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 296 с.
3. Офрихтер, Я.В. Балансировка обучающей выборки при обучении искусственных нейронных сетей для решения геотехнических задач / Я.В. Офрихтер, А.Б. Пономарев. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.11 // *Construction and Geotechnics*. – 2023. – Vol. 14, № 2. – С. 144–153. – EDN DYTGEV.
4. Yuan, B. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper / B. Yuan, C.S. Choo, L.Y. Yeo [et al.]. – DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029 // *Geomechanics and Geoengineering*. – 2025. – Vol. 20, № 5. – С. 1128–1159.
5. Geostru Editor. The observational method in geotechnical design / Geostru Editor // *Geostru Blog*. – December 12, 2022. – URL: <https://blog.geostru.eu/en/the-observational-method-in-geotechnical-design>
6. Vogel, C.R. *Computational Methods for Inverse Problems* / C.R. Vogel. – Philadelphia: SIAM, 2002. – DOI: 10.1137/1.9780898717570. – URL: <https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898717570> (дата обращения: 18.10.2025).
7. Петряшев, С.О. Разработка и верификация комплексной модели системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции» Саяно-Шушенской ГЭС как основы для внедрения в систему мониторинга / С.О. Петряшев, А.М. Белостоцкий, Д.С. Дмитриев // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов : ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 248–250. – EDN CZZSFA.
8. Белостоцкий, А.М. Компьютерное моделирование уникальных зданий и сооружений на всех этапах жизненного цикла. Опыт 2018-2023 гг., проблемы и решения / А.М. Белостоцкий // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума*, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов : ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 12–14. – EDN LWZCYQ.
9. Соловьев, В.Н. Численные алгоритмы решения плохо обусловленных задач в условиях стохастической неопределенности / В.Н. Соловьев // *Системный анализ в науке и образовании*. – 2010. – № 3. – С. 74–82. – EDN MUTNFZ.
10. Kabanikhin, S.I. *Inverse and ill-posed problems: theory and applications* / S.I. Kabanikhin. – Berlin ; Boston : De Gruyter, 2012. – 475 p. – (Inverse and ill-posed problems series; vol. 55).
11. Тихонов, А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения / А.Н. Тихонов // *Доклады Академии наук СССР*. – 1965. – Т. 163, № 3. – С. 591–594.
12. Waisnor, B.M. *Geotechnical engineering within the Piedmont Physiographic Province: report of a study performed by the Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research* / B.M. Waisnor, A. Ducote-Price, B. Jarosz, J.M. Duncan, C.J. Smith. – Blacksburg, VA : Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research, 2001. – 27 p.
13. Shahin, M.A. State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering / M.A. Shahin, M.B. Jaksa, H.R. Maier // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2008. – Bouquet – P. 1–14.
14. Mesri G., Olson R.E. Shear strength of montmorillonite // *Géotechnique*. – 1970. – Vol. 20, № 3. – P. 261–270.
15. Shahin, M.A. Artificial neural network applications in geotechnical engineering / M.A. Shahin, M.B. Jaksa, H.R. Maier // *Australian Geomechanics Journal*. – 2001. – Vol. 36, № 1. – P. 49–62.



16. Николоюкин, А.Н. Нейронные сети глубокого обучения в задачах проектирования стальных ферм / А.Н. Николоюкин, П.В. Монастырев // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы XI Международной научно-практической конференции. Направление конференции «Вызовы, стратегии и решения комплексного развития территорий», Тамбов, 28–29 мая 2025 года. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2025. – С. 223–225. – EDN XIVPLA.

17. Baghbani, A. Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: a state-of-the-art review / A. Baghbani, T. Choudhury, S. Costa, J. Reiner. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103991 // Earth-Science Reviews. – 2022. – Vol. 228. – Art. 103991.

## References

1. Shao, W. The application of machine learning techniques in geotechnical engineering: a review and comparison / W. Shao, W. Yue, Y. Zhang, T. Zhou, Y. Zhang, Y. Dang, H. Wang, X. Feng, Z. Chao // Mathematics. – 2023. – Vol. 11, Iss. 18.

2. Ledenev, V.V. Design Models for Building Structures / V.V. Ledenev, P.V. Monastayrev, G.M. Kulikov, S.V. Plotnikova. – Tambov : Publishing House of Tambov State Technical University, 2016. – 296 p.

3. Ofrikhter, Y.V. Balancing the training dataset when training artificial neural networks for solving geotechnical problems / Y.V. Ofrikhter, A.B. Ponomarev. – DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.11 // Construction and Geotechnics. – 2023. – Vol.14, №(2). – P.144–153. – EDN DYTGEV.

4. Yuan, B. Physics-informed machine learning in geotechnical engineering: a direction paper / B. Yuan, C.S. Choo, L.Y. Yeo [et al.]. – DOI: 10.1080/17486025.2025.2502029 // Geomechanics and Geoengineering. – 2025. – Vol. 20, № 5. – С. 1128–1159.

5. Geostru Editor. The observational method in geotechnical design / Geostru Editor // Geostru Blog. – December 12, 2022. – URL: <https://blog.geostru.eu/en/the-observational-method-in-geotechnical-design>

6. Vogel, C.R. Computational Methods for Inverse Problems / C.R. Vogel. – Philadelphia: SIAM, 2002. – DOI: 10.1137/1.9780898717570. – URL: <https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9780898717570> (дата обращения: 18.10.2025).

7. Petryashev, S.O. Development and verification of an integrated model of the “foundation–reservoir–dam–station building” system of the Sayano-Shushenskaya HPP as a basis for implementation into the monitoring system / S. O. Petryashev, A. M. Belostotsky, D. S. Dmitriev // In Proceedings of the VIII International Symposium “Current Problems of Computer Modeling of Structures and Facilities,” Tambov, May 17–21, 2023. – Tambov : Chesnokova A.V. Publ., 2023. – P. 248–250. – EDN CZZSFA.

8. Belostotsky, A. M. Computer modeling of unique buildings and structures at all stages of the life cycle. Experience 2018–2023: problems and solutions / A. M. Belostotsky // In Proceedings of the VIII International Symposium “Current Problems of Computer Modeling of Structures and Facilities,” Tambov, May 17–21, 2023. – Tambov : Chesnokova A.V. Publ., 2023. – P. 12–14. – EDN LWZCYQ.

9. Soloviev, V.N. Numerical algorithms for solving ill-conditioned problems under stochastic uncertainty / V.N. Soloviev // System Analysis in Science and Education. – 2010. – №3. – P. 74–82. – EDN MUTNFZ.

10. Kabanikhin, S.I. Inverse and ill-posed problems: theory and applications / S.I. Kabanikhin. – Berlin ; Boston : De Gruyter, 2012. – 475 p. – (Inverse and ill-posed problems series; vol. 55).

11. Tikhonov, A.N. On ill-posed problems in linear algebra and a stable method for their solution / A.N. Tikhonov // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. – 1965. – Vol.163, №(3). – P.591–594.

12. Waisnor, B.M. Geotechnical engineering within the Piedmont Physiographic Province: report of a study performed by the Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research / B.M. Waisnor, A. Ducote-Price, B. Jarosz, J.M. Duncan, C.J. Smith. –

Blacksburg, VA : Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research, 2001. – 27 p.

13. Shahin, M.A. State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering / M.A. Shahin, M.B. Jaksa, H.R. Maier // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2008. – Bouquet – P. 1–14.

14. Mesri G., Olson R.E. Shear strength of montmorillonite // *Géotechnique*. – 1970. – Vol. 20, № 3. – P. 261–270.

15. Shahin, M.A. Artificial neural network applications in geotechnical engineering / M.A. Shahin, M.B. Jaksa, H.R. Maier // *Australian Geomechanics Journal*. – 2001. – Vol. 36, № 1. – P. 49–62.

16. Nikolyukin, A.N. Deep learning neural networks in the design of steel trusses / A.N. Nikolyukin, P.V. Monastyrer // In *Sustainable Regional Development: Architecture, Construction, Transport. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference “Challenges, Strategies and Solutions for Integrated Territorial Development,”* Tambov, May 28–29, 2025. – Tambov : Tambov State Technical University, 2025. – P. 223–225. – EDN XIVPLA.

17. Baghbani, A. Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: a state-of-the-art review / A. Baghbani, T. Choudhury, S. Costa, J. Reiner. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103991 // *Earth-Science Reviews*. – 2022. – Vol. 228. – Art. 103991.

*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

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

*Российский университет дружбы народов  
им. Патриса Лумумбы*

Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

**Языев Сердар Батырович**,  
доктор технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Технология строительства  
и конструкционные материалы»

*Казанский (Приволжский) федеральный  
университет*

г. Казань, Кремлёвская улица, 18, корп. 1

**Артемьев Дмитрий Александрович**,  
доцент кафедры «Конструктивно-  
дизайнерское проектирование»

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

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

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

*Peoples' Friendship University of Russia  
named after Patrice Lumumba*

Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6

**Yazyev Serdar Batyrovich**,  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department «Construction  
Technology and Structural Materials»

*Federal State Autonomous Educational  
Institution of Higher Education «Kazan (Volga  
Region) Federal University»*

Kazan, Kremlin Street, 18, building 1

**Artemyev Dmitry Aleksandrovich**,  
Associate Professor of the Department  
«Structural Design»

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ: ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД

И.А. Гарькина, С.Б. Языев, Д.А. Артемьев

Анализируется применение энтропийного подхода в оценке технического состояния строительных конструкций. Приводится методика количественного определения энтропийных показателей на основе комплексного анализа параметров деформаций, коррозионных повреждений и иных видов дефектов строительных элементов. Дается пример практической реализации предложенного подхода для диагностики состояния металлического каркаса промышленного здания с расчетом специфических энтропийных характеристик на основе результатов инструментальных измерений и экспертных оценок. Постулируется, что использование энтропийного метода позволяет объективно и количественно характеризовать степень деградации конструкций на различных этапах эксплуатации, обеспечивает возможность прогнозирования остаточного ресурса путем анализа динамики изменения энтропийных показателей во времени. Полученные результаты подтверждают эффективность энтропийного подхода для повышения информативности и достоверности оценки технического состояния строительных конструкций, что является важным аспектом при планировании мероприятий по их ремонту и модернизации.

*Ключевые слова:* строительные конструкции, техническое состояние, оценка, диагностика, надежность, остаточный ресурс, энтропия

## ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDING STRUCTURES: AN ENTROPY APPROACH

I.A. Garkina, S.B. Yazyev, D.A. Artemyev

This article examines the application of an entropy approach to assessing the technical condition of building structures. A methodology for quantitatively determining entropy parameters is presented,

based on a comprehensive analysis of deformation parameters, corrosion damage, and other types of defects in building elements. A practical example of the proposed approach's implementation is provided for diagnosing the condition of an industrial building's metal frame, calculating specific entropy characteristics based on instrumental measurements and expert assessments. It is postulated that the use of the entropy method allows objective and quantitative characterization of the degree of structural degradation at various stages of operation and enables the prediction of residual service life by analyzing the dynamics of entropy parameter changes over time. The obtained results confirm the effectiveness of the entropy approach for increasing the information content and reliability of assessing the technical condition of building structures, which is an important aspect when planning repair and modernization measures.

*Keywords: building structures, technical condition, assessment, diagnostics, reliability, residual life, entropy*

**Введение.** Современные методы диагностики и оценки технического состояния строительных конструкций характеризуются необходимостью применения комплексного подхода, охватывающего широкий спектр факторов, оказывающих влияние на надежность и долговечность зданий и сооружений [1...5]. Традиционные методики, как правило, основаны на использовании детерминистических моделей, которые не в полной мере отражают сложную природу процессов деградации строительных систем, обусловленной в том числе стохастическим характером изменения эксплуатационных свойств материалов и факторов окружающей среды.

Актуальность разработки и внедрения современных подходов к оценке технического состояния строительных конструкций обусловлена рядом недостатков, присущих традиционным методам экспертной диагностики. К основным проблемам, требующим системного научного разрешения, относятся:

- высокая степень субъективности экспертной оценки, обусловленной зависимостью результатов от профессиональной квалификации и индивидуального опыта специалиста, осуществляющего обследование строительных объектов (как следствие – отсутствие необходимой воспроизводимости и стабильности оценочных процедур);
- фрагментарность существующих показателей состояния объекта, проявляющаяся в отсутствии единого интегрального критерия, способного агрегировать количественные и качественные характеристики технического состояния в универсальный показатель деградации, что существенно усложняет принятие решений на всех этапах жизненного цикла сооружения;
- недостаточный учет степени неопределённости (присущей рассматриваемым процессам), связанной с вероятностным характером развития дефектов, возникновения повреждений и изменчивостью эксплуатационных свойств строительных материалов (не находит отражения в традиционных детерминистических моделях, что ведет к снижению достоверности прогнозных оценок);
- сложность построения адекватных прогнозных моделей для определения остаточного ресурса строительных конструкций на основании ограниченного массива текущих диагностических данных, что обусловлено как разрозненностью информации, так и недостаточной корреляцией между имеющимися показателями и фактическим сроком безопасной эксплуатации.

Таким образом, существует объективная необходимость в разработке и внедрении современных научно обоснованных методов комплексной количественной оценки технического состояния строительных конструкций, обладающих высокой степенью объективности, интегративности, устойчивости к неопределёностям и прогностической эффективностью.

**Энтропийный метод.** В свете существующих ограничений классических оценочных подходов особый интерес представляет энтропийный метод, опирающийся на фундаментальные принципы теории информации и термодинамики. Он позволяет проводить количественную оценку уровня деградации строительных конструкций, учитывая существующую неопределённость и вариабельность как исходных параметров, так и проявлений процессов старения. Важной его особенностью является возможность интеграции разнородных показателей технического состояния в единую

информативную метрику, обладающую высокой чувствительностью к незначительным изменениям в структуре и свойствах конструкций. Энтропийный метод представляет собой перспективный инструмент для оценки технического состояния строительных конструкций, способствует формированию единой унифицированной системы оценки надежности и остаточного ресурса строительных объектов. Метод основан на применении концепции информационной энтропии, введенной К. Шенноном и адаптированной к задачам инженерной диагностики и управления состоянием сложных конструктивных систем. Данный подход рассматривает строительные конструкции как информационные системы, динамика изменения которых может быть количественно охарактеризована посредством энтропийных показателей. Суть метода заключается в измерении и анализе степени неопределенности, связанной с функциональными параметрами конструкции, что позволяет выявлять отклонения от нормативного состояния за счёт увеличения или уменьшения энтропии системы.

В практическом плане реализация энтропийного метода включает формализацию набора диагностических признаков технического состояния, построение вероятностных распределений характеристик на основании мониторинговых или натурных данных, вычисление значений энтропии для каждого состояния и интерпретацию полученных результатов с точки зрения надёжности и остаточного ресурса конструкции. Такой подход позволяет не только объективно оценивать текущий уровень технического состояния строительных конструкций, но и прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации, принимать обоснованные решения о целесообразности проведения ремонтных или восстановительных мероприятий; способствует повышению информативности и достоверности инженерной диагностики, что особенно важно для обеспечения безопасности и долговечности строительных объектов [6...8].

Энтропия системы  $H$  определяется по формуле

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i ,$$

где  $p_i$  – вероятность  $i$ -го состояния системы;  $n$  – общее количество возможных состояний; основание 2 при логарифме свидетельствует о том, что рассматриваются два состояния: работоспособное и неработоспособное/отказ.

Для строительных конструкций энтропия характеризует степень неопределенности в их техническом состоянии; увеличение энтропии соответствует деградации конструкции.

**Адаптация метода для строительных конструкций.** Техническое состояние конструкции характеризуется набором параметров (прочностные характеристики, геометрические отклонения, дефекты и повреждения). Каждый параметр  $x_i$  нормируется (приводится к безразмерному виду):

$$x_{inorm} = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} .$$

Вероятности состояний определяются через весовые коэффициенты параметров:

$$p_i = \frac{c_i x_{inorm}}{\sum_{i=1}^n c_i x_{inorm}} ,$$

$c_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра, учитывающий его влияние на общее состояние конструкции.

Проиллюстрируем применение энтропийного метода на практическом примере (оценка технического состояния металлического каркаса промышленного здания, эксплуатируемого в течение 25 лет).

Исходные данные: обследуемый объект представляет собой одноэтажное промышленное здание с металлическим каркасом, расположенное в промышленной зоне с повышенной агрессивностью среды; основные несущие элементы выполнены из стали С255.

Для анализа выбраны следующие ключевые параметры:

$x_1$  – степень коррозии несущих элементов (измеряется в процентах потери сечения, текущее значение – 8,5 %, минимальное значение – 0 %, максимальное (критическое) значение – 25 %);

$x_2$  – прогибы балок покрытия (измеряются отношением фактического прогиба к предельно допустимому; текущее значение – 0,65, минимальное – 0, максимальное – 1);

$x_3$  – отклонения от вертикали колонн (измеряются в долях от высоты колонны; текущее значение – 1/750, минимальное значение – 0, максимальное – 1/400);

$x_4$  – дефекты сварных соединений (процент дефектных соединений от общего количества; текущее значение – 12 %, минимальное значение – 0 %, максимальное – 30 %);

$x_5$  – потеря устойчивости элементов (количественная оценка на основе визуального обследования (балльная система 0-10); текущее значение – 3,2 балла; минимальное – 0 баллов, максимальное – 10 баллов).

После нормирования каждого параметра будем иметь:

$$x_1 = 0,34; x_2 = 0,65; x_3 = 0,53; x_4 = 0,40; x_5 = 0,32.$$

На основе экспертной оценки и анализа влияния каждого параметра на несущую способность конструкции принимаем весовые коэффициенты:

$$c_1 = 0,30, c_2 = 0,25, c_3 = 0,15, c_4 = 0,20, c_5 = 0,10; \sum_{i=1}^5 c_i = 1.$$

Имеем:

$$\sum_{i=1}^5 c_i x_{i\text{norm}} = 0,102 + 0,163 + 0,080 + 0,080 = 0,425.$$

Тогда вероятности состояний по каждому параметру:

$$p_1 = \frac{0,102}{0,425} = 0,223; p_2 = \frac{0,163}{0,425} = 0,357; p_3 = \frac{0,080}{0,425} = 0,175;$$

$$p_4 = \frac{0,080}{0,425} = 0,175; p_5 = \frac{0,032}{0,425} = 0,070; \sum_{i=1}^5 p_i = 1.$$

Энтропия системы:

$$H = 2,163 \text{ бит.}$$

Максимальная энтропия для системы с 5 параметрами:

$$H_{\max} = \log_2 5 = 2,322 \text{ бит.}$$

Относительная энтропия:

$$H_r = \frac{H}{H_{\max}} = 0,932.$$

При следующей классификации технического состояния ( $H_r < 0,3$  – отличное;  $0,3 \leq H_r < 0,5$  – хорошее;  $0,5 \leq H_r < 0,7$  – удовлетворительное;  $0,7 \leq H_r < 0,9$  – неудовлетворительное;  $H_r \geq 0,9$  – аварийное) полученное значение  $H_r = 0,932$  указывает на то, что металлический каркас находится в аварийном состоянии и требует немедленных мер по усилению или замене критических элементов.

На основе динамики изменения энтропии можно оценить и остаточный ресурс конструкции. Предполагая линейный рост энтропии во времени и зная историю изменения параметров, остаточный ресурс до достижения критического состояния ( $H_r = 1$ ) определяем следующим образом:

$$T_{\text{ост}} = \frac{H_{\text{крит}} - H_{\text{тек}}}{\frac{dH}{dt}},$$

где  $\frac{dH}{dt}$  – скорость роста энтропии. При текущей скорости деградации  $\frac{dH}{dt} = 0,035$  бит/год остаточный ресурс составляет 4,5 года.

Автоматизация мониторинга технического состояния конструкций на основе энтропийного подхода открывает возможности для интеграции с современными автоматизированными системами мониторинга. Его применение позволяет реализовать непрерывное отслеживание параметров состояния строительных конструкций в режиме реального времени, что способствует своевременному выявлению отклонений от нормы и потенциально опасных изменений; существенно повышает оперативность реагирования и эффективность профилактических мероприятий, что снижает риск аварийных ситуаций и внеплановых ремонтов.

На основании динамики изменений энтропийных показателей становится возможным осуществлять риск-ориентированное планирование диагностических мероприятий, что позволяет рационально распределять ресурсы и минимизировать издержки, связанные с проведением обследований.

В рамках управления жизненным циклом зданий и сооружений внедрение энтропийного метода обеспечивает количественную базу для принятия обоснованных решений относительно необходимости проведения ремонтных, восстановительных или усилительных работ, возможной замены элементов конструкций. Использование энтропии как объективного индикатора степени деградации материалов и конструкций способствует развитию научно обоснованных стратегий эксплуатации объектов недвижимости.

Для страхования и оценки рисков энтропийные показатели могут служить объективной метрикой технического состояния строительных объектов. Это позволяет страховым компаниям более точно рассчитывать вероятности наступления страховых событий и определять справедливые размеры страховых премий, формировать дифференцированные тарифы исходя из фактического уровня риска.

В сфере нормативного регулирования повсеместное внедрение энтропийного метода может стать стимулом к совершенствованию действующих стандартов и методик по техническому обследованию, мониторингу и контролю состояния строительных объектов. Включение энтропийных критериев в нормативные документы позволит формализовать процессы диагностики и закрепить объективные количественные оценки для различных стадий эксплуатации.

Что касается процессов цифровизации строительной отрасли, энтропийный метод органично сочетается с концепцией цифровых двойников и технологиями информационного моделирования зданий (BIM). Использование энтропийных данных в системах BIM позволяет реализовать интеллектуальный мониторинг технического состояния конструкций, повышая точность и прогнозируемость управления жизненным циклом объекта, способствуя формированию замкнутых цифровых экосистем в строительстве.

Таким образом, комплексная интеграция энтропийного метода в современные технологические и управленческие процессы строительной индустрии способствует развитию научно обоснованных подходов к обеспечению безопасности, надежности и экономичности строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

**Выводы.** Энтропийный подход демонстрирует высокую эффективность для количественной оценки степени деградации строительных конструкций посредством анализа совокупности измеряемых параметров, характеризующих техническое состояние объекта. Его применение позволяет учесть имеющуюся неопределенность и вариабельность получаемых данных, что обеспечивает более объективную основу для принятия управленческих решений относительно необходимости проведения ремонтно-восстановительных мероприятий. Практическая апробация метода на примере металлического каркаса промышленного здания выявила удовлетворительную согласованность результатов энтропийного анализа и традиционного инженерного обследования, подтвердив критическое состояние конструкции и тем самым повысив достоверность выводов о ее техническом состоянии.



Для эффективной интеграции энтропийного метода в систему технической диагностики строительных конструкций целесообразно осуществлять поэтапное внедрение, начиная с наиболее ответственных и подверженных риску объектов капитального строительства. Необходимо инициировать развитие современной нормативной и методической базы, устанавливающей стандартизированные процедуры применения энтропийного анализа, четкие критерии и пороговые значения оценки технического состояния конструкций в различных условиях эксплуатации. Особое значение имеет формирование специализированных баз данных, аккумулирующих статистическую информацию о динамике параметров состояния различных типов конструкций, что позволит совершенствовать прогнозирование темпов деградации и перехода между состояниями. Рекомендуется проведение всесторонних дополнительных исследований, направленных на оптимизацию системы весовых коэффициентов для параметров, отражающих особенности различных типов конструкций и специфики их эксплуатации. Для повышения практической доступности метода требуются разработка и внедрение современных программных средств, обеспечивающих автоматизацию расчетов энтропийных показателей, интеграцию с существующими системами мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

### Список литературы

1. Будылина, Е.А. Идентификация и экспертиза сложных систем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 21–29.
2. Будылина, Е.А. Системный анализ как методология решения проблем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 14–20.
3. Гарькин, И.Н. Оценка эффективности мониторинга состояния объектов культурного наследия / И.Н. Гарькин, И.А. Гарькина, А.Э. Кудишина // Моделирование и механика конструкций. – 2025. – № 21. – С. 167–172.
4. Гарькин, И.Н. Деформативно-прочностные свойства монолитных железобетонных перекрытий / И.Н. Гарькин, Д.С. Саженко // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 126–129.
5. Языев, С.Б. Метод энергии в расчете на устойчивость плоской формы изгиба консольной полосы с учетом собственного веса / С.Б. Языев // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3, № 1. – С. 76–82.
6. Маилян, Л.Д. Энтропийный подход к оценке эффективности инноваций в сфере управления инвестиционно-строительными проектами / Л.Д. Маилян, С.А. Илюшин, К.А. Зеленцов // Строительство и архитектура – 2023 : материалы Международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства. – 2023. – С. 228–229.
7. Дулесов, А.С. Показатель разграничения уровня надежности технической системы по качественному признаку: энтропийный подход / А.С. Дулесов, Н.В. Дулесова, Д.Ю. Карандеев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2–3. – С. 477–481.
8. Маркова, Г.В. Энтропийный подход для оценки остаточного ресурса металлических изделий / Г.В. Маркова, А.Д. Гусев // Сборник XIII Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов». – 2024. – С.25.

### References

1. Budylna, E.A. Identification and examination of complex systems / E.A. Budylna, I.A. Gar'kina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №4 (57). – P. 21–29.
2. Budylna, E.A. Systems analysis as a methodology for solving problems / E.A. Budylna, I.A. Gar'kina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2 (55). – P. 14–20.

3. Gar'kin, I.N. Evaluation of the effectiveness of monitoring the state of cultural heritage sites / I.N. Gar'kin, I.A. Gar'kina, A.E. Kudishina // Modeling and mechanics of structures. – 2025. – №21. – P. 167–72.
4. Gar'kin, I.N. Strength and Deformation Properties of Monolithic Reinforced Concrete Floors / I.N. Gar'kin, D.S. Sadenko // Regional Architecture and engineering. – 2020. – №1 (42). – P. 126–129.
5. Yazyev, S.B. Energy Method in Calculating the Stability of a Plane Bending Shape of a Cantilever Strip Taking into Account Its Own Weight / S.B. Yazyev // Construction Materials and Products. – 2020. – Vol. 3. – №1. – P. 76–82.
6. Mailyan, L.D. Entropy Approach to Assessing the Effectiveness of Innovations in the Management of Investment and Construction Projects / L.D. Mailyan, S.A. Ilyushin, K.A. Zelentsov // Construction and Architecture – 2023 : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering. – 2023. – P. 228–229.
7. Dulesov, A.S. Indicator of differentiation of the reliability level of a technical system based on a qualitative feature: an entropy approach / A.S. Dulesov, N.V. Dulesova, D.Yu. Karandeev // Fundamental research. – 2016. – № 2–3. – P. 477–481.
8. Markova, G.V. Entropy approach to assessing the residual life of metal products / G.V. Markova, A.D. Gusev // Proceedings of the XIII International Conference «Phase Transformations and Strength of Crystals». – 2024. – P. 25.

УДК 624.012

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_137

*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  
*Тюменский индустриальный университет*  
Россия, 625000, г.Тюмень,  
ул.Володарского, 38,  
тел.: +7(3452)28-36-70

**Овчинников Илья Игоревич,**  
доктор технических наук, доцент,  
и.о. зав. базовой кафедрой АО  
«Мостострой-11»  
E-mail: bridgeart@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  
*Tyumen Industrial University*  
Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,  
tel.: +7(3452)28-36-70

**Ovchinnikov Ilya Igorevich,**  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Acting Head of the Basic Department of JSC  
Mostostroy-11  
E-mail: bridgeart@mail.ru

## ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

О.В. Снежкина, И.И. Овчинников

Приводится методика оценки трещиностойкости железобетонных балок в зоне действия поперечных сил при изменении относительного пролета среза от 2 до 4.

Работа железобетонной балки моделируется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой и сжатой бетонной аркой криволинейного очертания.

В рассматриваемой расчетной модели учитывается влияние геометрических и прочностных характеристик железобетонной балки: прочности бетона и продольной арматуры, модуля упругости бетона и продольной арматуры, высоты, ширины балки, относительного пролета среза, площади сечения продольной арматуры, жесткости арки соответственно при изгибе, сдвиге, растяжении-сжатии.

*Ключевые слова: железобетонные балки, наклонное сечение, усилия трещинообразования, физическое моделирование, арка с затяжкой*

## CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN THE ZONE OF TRANSVERSE FORCES ACTION

O.V. Snezhkina, I. I. Ovchinnikov

A method of assessing crack resistance of reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces with a change in the relative shear span from 2 to 4 is presented.

The work of a reinforced concrete beam is modeled as a spacer system with a horizontal stretched chord, represented by longitudinal reinforcement and a compressed concrete arch of a curvilinear outline.

In the considered calculation model we take into account the influence of the geometric and strength characteristics of the reinforced concrete beam: the strength of concrete and longitudinal reinforcement, the modulus of elasticity of concrete and longitudinal reinforcement, the height, width of the beam, the relative shear span, the cross-sectional area of the longitudinal reinforcement, the rigidity of the arch under bending, shear and tension-compression, respectively.

*Keywords: reinforced concrete beams, inclined section, cracking forces, physical modeling, tie arch*

Существующие методы расчета железобетонных конструкций в полной мере не обладают универсальностью: методики, используемые по разным группам предельных состояний, недостаточно увязаны друг с другом; формулы, основанные на экспериментально-теоретических исследованиях подразумевают определенные границы их обоснованного применения, что приводит в ряде случаев к сомнительным результатам [1-4]. До настоящего времени в нормативной литературе отсутствуют рекомендации по оценке трещиностойкости наклонного сечения [1].

Ниже рассматривается возможность применения расчетной модели, обеспечивающей единый подход к оценке трещиностойкости по нормальному и наклонному сечениям железобетонных балок с относительным пролетом среза от 2 до 4.

Ранее для решения этой проблемы было проведено моделирование физической работы железобетонных балок с относительным пролетом среза до 1,5: расчетная каркасно-стержневая модель для определения прочности железобетонных балок с малым и средним относительным пролетом среза преобразовывалась до модели, позволяющей определять трещиностойкость указанных конструкций [5, 6]. Принцип построения расчетных моделей сводился к замене наклонной сжатой полосы бетона стержневой фермой, расчетный растянутый стержень общей модели принимался подобным каркасно-стержневой модели (КСМ). Задачу удалось свести к определению растягивающих усилий, действующих по длине сжатой наклонной бетонной полосы в поперечном направлении, а также к определению растягивающих усилий, действующих вдоль растянутого арматурного пояса. Имеется в виду определение тех растягивающих усилий, при которых в бетоне образуются наклонные (граничные) и вертикальные трещины [5, 6]. Характер образования и развития трещин в растянутой зоне является однозначным: в растянутом горизонтальном поясе бетона появляются трещины, имеющие вертикальную траекторию. Определение растягивающих поперечных усилий, действующих вдоль сжатого наклонного элемента каркасно-стержневой модели (в зоне действия поперечных сил), из-за сложного напряженного состояния остается проблематичным.

Работа конструкции (с относительным пролетом среза до 1,5) моделировалась в виде стержневых расчетных моделей, позволяющих определять величину растягивающего поперечного усилия внутри сжатой наклонной бетонной полосы (в зоне действия поперечных сил). В качестве первого варианта предлагался наиболее идеализированный подход к построению модели (рис. 1): в этом случае расчетная модель определения усилия трещиностойкости является зеркальным отображением модели КСМ, принятой при расчете прочности. Усилия в стержнях зеркальной модели поменяли свой знак на противоположный, по сравнению с моделью КСМ.

В качестве второго варианта (рис. 2) рассматривалась стержневая модель, в которой сжатые зоны бетона, расположенные между грузовой и опорными площадками, представлены в виде фермы с усилиями  $S_1$  (сжатие) и с усилием  $T_1$  (растяжение).

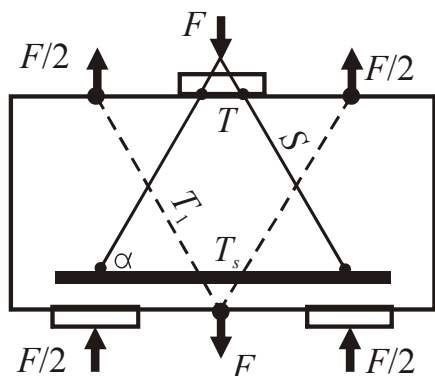


Рис. 1. Каркасно-стержневая модель №1 для определения трещиностойкости балок

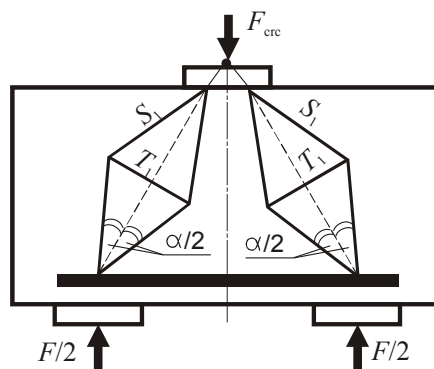


Рис. 2. Каркасно-стержневая модель №2 для определения трещиностойкости балок

В качестве третьего варианта рассматривалась модель, аналогичная в построении второму варианту, отличающаяся наличием двух поперечных растянутых элементов  $T_1$ , расположенных вблизи грузовой и опорных площадок (рис. 3). Характерным для второго и третьего вариантов является то, что угол между наклонными поясами ферм наклонного очертания принимался равным углу наклона сжатого подкоса модели КСМ.

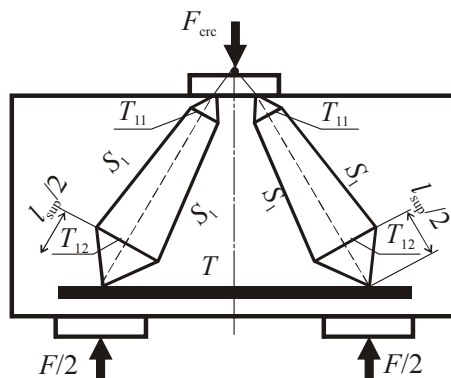


Рис. 3. Каркасно-стержневая модель №3 для определения трещиностойкости балок

В развитие ранее рассмотренных каркасно-стержневых моделей по оценке трещиностойкости железобетонных балок с относительным пролетом среза до 1,5 усиления трещинообразования в балках с относительным пролетом среза от 2 до 4 в наклонном и вертикальном сечениях предлагается определять на основе модернизированной каркасно-стержневой модели в виде двухшарнирной арки с затяжкой (рис. 4). К предлагаемой схеме приводит анализ траекторий главных сжимающих напряжений. Данная модель позволяет определять растягивающие поперечные усилия, действующие вдоль сжатого наклонного бетонного элемента модели (в зоне действия поперечных сил), приводящие к образованию наклонных трещин [7].

Как установлено многочисленными опытами, разрушение железобетонных элементов от действия поперечных сил происходит по наклонному сечению, проходящему по наклонной трещине при разрушении бетона над наклонной трещиной. В расчетном наклонном сечении прежде всего образуется наклонная трещина. Образование трещины (или нескольких трещин) происходит от действия главных растягивающих напряжений. Процесс образования и развития наклонных трещин может быть разным. При сравнительно небольших величинах изгибающих моментов в окрестности рассматриваемого наклонного сечения развитие трещины начинается в средней части высоты сечения. С ростом нагрузки трещина приближается к верхней и нижней сторонам балки и начинает разворачиваться вдоль нее [8]. Принципы работы многокритериальных систем подробно рассмотрены в работах [9-11].

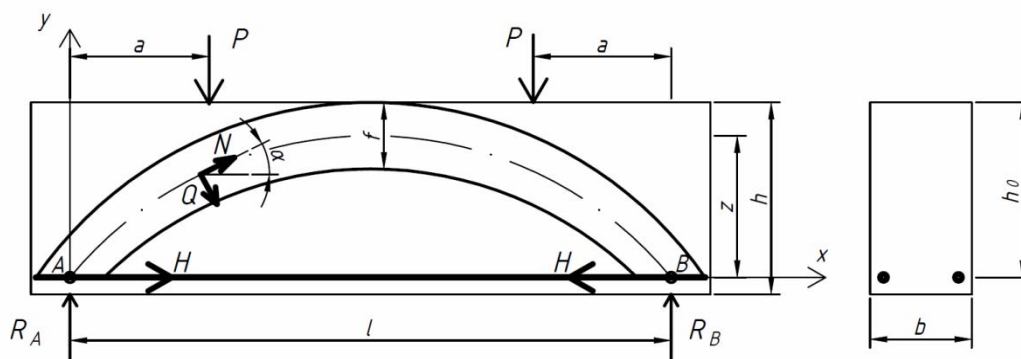


Рис. 4. Расчетная модель определения усилий трещинообразования железобетонных балок с  $a/h_0$  от 2 до 4

Работа железобетонной балки моделируется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом, представленным продольной арматурой и сжатой бетонной аркой криволинейного очертания (см. рис. 4). В проведенном исследовании решался вопрос определения продольных, поперечных усилий и моментов в наклонном сечении по длине арки (представляющей собой сжатый бетонный подкос).

В расчете использовались характеристики железобетонных балок без распределенного армирования (с относительным пролетом среза от 2 до 4) из экспериментальных исследований, проведенных Д. Кани в Американском институте бетона (табл. 1). Схема нагружения показана на рис. 4. Все опытные образцы имели единую схему разрушения – по наклонной трещине.

Таблица 1

Геометрические и прочностные характеристики опытных образцов

№	$b$ , м	$h_0$ , м	$a$ , м	$l$ , м	$a/h_0$	$A_s$ , м <sup>2</sup>	$R_s$ , МПа	$R_b$ , МПа	$2P_u$ , кН
1	0,153	0,270	0,543	2,0	2	0,0011	366,11	27,234	222
2	0,152	0,272	0,679	2,273	2,5	0,0011	366,11	26,20	168
3	0,156	0,271	0,814	2,542	3	0,0012	342,66	27,44	130
4	0,151	0,271	1,085	3,085	4	0,0012	341,98	27,44	110

При расчете арки применен метод сил. В расчетной схеме криволинейная ось арки изменяется по параболическому закону:

$$y = \frac{4z}{l^2} x(l-x),$$

угол наклона касательной в расчетных сечениях

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{4z}{l^2} (l-2x).$$

Ширина арки  $f$  (сжатого бетонного подкоса) определялась согласно действующему Своду правил из условия равновесия нормального сечения в стадии разрушения при  $N_s = N_b$ :

$$f = R_s A_s / R_b b.$$

Усилия в бетоне над наклонной трещиной представлены в виде продольной и поперечной составляющих  $N$  и  $Q$  (см. рис.1).

Расчетные величины определялись с использованием приближенного численного интегрирования по оси  $Ox$  ( $dx = \cos \alpha ds$ ) при разбиении пролета балки  $l$  на  $n$  частей с шагом  $\Delta x = 0,1$  м.

Усилие в рабочей растянутой арматуре (в затяжке арки) определяется соотношением

$$H = - \frac{\int_0^s \frac{\overline{M}_1 M_p ds}{EJ} + \int_0^s k \frac{\overline{Q}_1 Q_p}{GA} + \int_0^s \frac{\overline{N}_1 dN_p s}{EA}}{\int_0^s \frac{\overline{M}_1^2 ds}{EJ} + \int_0^s k \frac{\overline{Q}_1^2 ds}{GA} + \int_0^s \frac{\overline{N}_1^2 ds}{EA} + \int_0^l \frac{\overline{H}_1^2 dx}{EA_s}},$$

где  $EI$ ,  $GA$ ,  $EA$  – жесткости арки соответственно при изгибе, сдвиге и растяжении-сжатии;  $k$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте сечения арки при изгибе;  $\overline{M}_1$ ,  $\overline{Q}_1$ ,  $\overline{N}_1$  – законы изменения эпюр моментов, поперечных и продольных сил в арке от действия единичной силы в затяжке;  $H$  – действительное усилие в затяжке (в нижней рабочей арматуре);  $M_p$ ,  $Q_p$ ,  $N_p$  – законы изменения эпюр моментов, поперечных и продольных сил в арке от действия внешней нагрузки, выраженные через балочные значения.

Окончательные эпюры изгибающих распора, моментов, продольных и поперечных сил определены по зависимостям:

$$\begin{aligned}M &= -yH + M_p, \\Q &= -\sin \alpha H + Q_p, \\N &= -\cos \alpha H + N_p.\end{aligned}$$

По эпюрам изгибающих моментов, продольных и поперечных сил выявлены наиболее опасные сечения, определены напряжения. Результаты расчета представлены в табл. 2, 3, 4 (так как конструкция нагружена симметрично, приведен расчет  $\frac{1}{2}$  длины балки).

Т а б л и ц а 2

Расчетные усилия и напряжения, действующие в наклонном сечении вдоль арки при  $a/h_0 = 2$

N	X, m	Y, m	M, Nm	Q, N	N, N	$\sigma_2 \cdot 10^6$ , MPa	$\sigma_1 \cdot 10^6$ , MPa
1	0	0	0	-13503,7	-205876	-12,4774	-0,79213
2	0,05	0,026325	-609,406	-8033,97	-208180	-12,617	-0,47655
3	0,15	0,074925	-880,617	3276,562	-212645	-12,8876	0,198524
4	0,25	0,118125	111,6406	15052,29	-216865	-13,1433	0,930101
5	0,35	0,155925	2367,366	27245,02	-220771	-13,3801	1,713827
6	0,45	0,188325	5886,559	39791,37	-224292	-13,5935	2,542972
7	0,55	0,215325	10669,22	52612,86	-227359	-13,7793	3,408338
8	0,65	0,236925	5615,348	-43452,1	-229905	-13,9337	-2,84641
9	0,75	0,253125	1824,944	-31302,7	-231872	-14,0529	-2,06809
10	0,85	0,263925	-701,991	-18890,2	-233212	-14,134	-1,25523
11	0,95	0,269325	-1965,46	-6315,04	-233890	-14,1752	-0,42085

Разрушающая нагрузка железобетонной балки с относительным пролетом среза  $a/h_0 = 2$  составляет 222 кН, максимальное усилие на сжатие в арке  $N = -233,890$  кН достигается в зоне чистого изгиба (главные сжимающие напряжения  $\sigma_2 = -14,175 \cdot 10^6$  МПа), максимальное растягивающее поперечное усилие  $Q = 52,613$  кН достигается в пролете среза при  $x = a = 0,543$  м (главные растягивающие напряжения  $\sigma_1 = 3,408 \cdot 10^6$  МПа).

Т а б л и ц а 3

Расчетные усилия и напряжения, действующие в наклонном сечении вдоль арки при  $a/h_0 = 3$

N	X, m	Y, m	M, Nm	Q, N	N, N	$\sigma_2 \cdot 10^6$ , MPa	$\sigma_1 \cdot 10^6$ , MPa
1	0	0	0	-77774,1	-179368	-12,3719	-4,57522
2	0,05	0,021246	-903,756	-15121,9	-180492	-12,4494	-0,89515
3	0,15	0,061138	-2202,65	-8967,44	-182659	-12,5989	-0,5372
4	0,25	0,09756	-2823,37	-2660,89	-184707	-12,7402	-0,16119
5	0,35	0,130514	-2765,93	3785,05	-186621	-12,8722	0,231667
6	0,45	0,159998	-2030,33	10355,52	-188385	-12,9939	0,639807
7	0,55	0,186014	-616,559	17033,55	-189984	-13,1041	1,061334
8	0,65	0,208562	1475,373	23800,13	-191402	-13,202	1,494025
9	0,75	0,22764	4245,469	30634,44	-192628	-13,2865	1,935356
10	0,8	0,235878	5884,829	34070,03	-193165	-13,3236	2,158399
11	0,85	0,24325	4443,73	-26869,2	-193649	-13,3569	-1,70648
12	0,95	0,25539	2070,155	-20235,7	-194454	-13,4125	-1,29052
13	1,05	0,264062	374,7446	-13530,8	-195035	-13,4526	-0,8655
14	1,15	0,269266	-642,502	-6777,57	-195386	-13,4768	-0,43431
15	1,25	0,271	-981,584	0	-195504	-13,4849	0

Разрушающая нагрузка железобетонной балки с относительным пролетом среза  $a/h_0 = 3$  составляет 130 кН, максимальное усилие на сжатие в арке  $N = -195,504$  кН достигается в зоне чистого изгиба (главные сжимающие напряжения  $\sigma_2 = -13,485 \cdot 10^6$  МПа), максимальное растягивающее поперечное усилие  $Q = 34,070$  кН достигается в пролете среза при  $x = a = 0,804$  м (главные растягивающие напряжения  $\sigma_1 = 2,158 \cdot 10^6$  МПа).

Таблица 4

Расчетные усилия и напряжения, действующие в наклонном сечении вдоль арки при  $a/h_0 = 4$

N	X, m	Y, m	M, Nm	Q, N	N, N	$\sigma_2 \cdot 10^6$ , МПа	$\sigma_1 \cdot 10^6$ , МПа
1	0	0	0	-67249,8	-186116	-12,8631	-4,18498
2	0,05	0,017766	-765,679	-13332	-186824	-12,912	-0,83281
3	0,15	0,05149	-1939,51	-8896,21	-188192	-13,0066	-0,55979
4	0,25	0,082806	-2636,64	-4392,95	-189489	-13,0962	-0,27833
5	0,35	0,111712	-2857,07	172,7359	-190711	-13,1806	0,011015
6	0,45	0,13821	-2600,79	4795,253	-191851	-13,2595	0,307606
7	0,55	0,162299	-1867,81	9468,518	-192906	-13,3324	0,610727
8	0,65	0,183979	-658,134	14185,99	-193871	-13,399	0,919583
9	0,75	0,20325	1028,248	18940,7	-194740	-13,4591	1,233306
10	0,85	0,220112	3191,332	23725,28	-195511	-13,5124	1,550962
11	0,95	0,234566	5831,119	28532,05	-196179	-13,5586	1,87156
12	1	0,240889	7329,775	30941,27	-196473	-13,5789	2,032637
13	1,05	0,24661	6197,607	-21326,7	-196740	-13,5974	-1,40293
14	1,15	0,256246	4290,798	-16625,6	-197193	-13,6287	-1,0962
15	1,25	0,263472	2860,692	-11896	-197535	-13,6523	-0,78571
16	1,35	0,26829	1907,287	-7145,87	-197764	-13,6681	-0,47252
17	1,45	0,270699	1430,585	-2383,34	-197879	-13,676	-0,15769

Разрушающая нагрузка железобетонной балки с относительным пролетом среза  $a/h_0 = 4$  составляет 110 кН, максимальное усилие на сжатие в арке  $N = -197,8879$  кН достигается в зоне чистого изгиба (главные сжимающие напряжения  $\sigma_2 = -13,676 \cdot 10^6$  МПа), максимальное растягивающее поперечное усилие  $Q = 30,941$  кН достигается в пролете среза при  $x = a = 1,085$  м (главные растягивающие напряжения  $\sigma_1 = 2,033 \cdot 10^6$  МПа).

Основное развитие деформаций от действия растягивающих усилий в арке происходит в направлении растянутого арматурного пояса. Развитие деформаций во внешнюю сторону арки сдерживается зоной окружающего сжатого бетона, что, в свою очередь, способствует упрочнению сжатого бетонного арочного пояса (при малых пролетах среза это влияние более выражено).

Расчетная модель позволяет определить усилия, действующие в наклонном сечении через предельные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  (как в самой сжатой бетонной арке, так и вдоль предполагаемой траектории наклонной трещины). Предельные значения главных сжимающих и растягивающих напряжений можно принять равными их максимальным значениям.

Тогда, согласно расчетной модели, усилия трещинообразования, действующие в наклонном сечении, выраженные через внешние усилия, определяются как

$$Q = -H \sin \alpha + Q_p \cos \alpha,$$

а расчетное условие образования наклонной трещины в железобетонных балках без поперечной арматуры в зоне действия поперечных сил можно представить в виде

$$Q \geq Q_{crc},$$

где  $Q_{crc}$  – поперечное растягивающее усилие в арке,

$$Q_{crc} = \gamma R_{bt} bds.$$



Учет неравномерности распределения напряжений по ширине арки может быть выполнен путем корректировки поправочным коэффициентом  $\gamma$  при дополнительных экспериментальных исследованиях.

#### Выводы

Предложен альтернативный метод оценки трещиностойкости наклонного сечения изгибаемых железобетонных элементов без распределенной арматуры с относительным пролетом среза ( $2 \leq a/h_0 \leq 4$ ) в зоне действия поперечных сил по арочной модели.

Работа железобетонной балки представляется как распорная система с горизонтальным растянутым поясом в виде продольной арматуры и сжатой бетонной арки криволинейного очертания. Расчетная модель позволяет определять поперечные усилия, приводящие к образованию наклонной трещины.

Расчет трещиностойкости наклонного сечения учитывает влияние геометрических и прочностных характеристик железобетонной балки: прочности бетона и продольной арматуры, модуля упругости бетона и продольной арматуры, высоты, ширины балки, относительного пролета среза, площади сечения продольной арматуры, жесткости арки соответственно при изгибе, сдвиге и растяжении-сжатии.

Предложенный метод расчета трещиностойкости железобетонных балок позволяет учитывать взаимное влияние моментов и поперечных сил.

#### Список литературы

1. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Теркин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.
2. 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.
3. Мирсаяпов, Ил.Т. Обеспечение безопасности железобетонных балок по наклонному сечению при многократно повторяющихся нагрузках / Ил.Т. Мирсаяпов // Жилищное строительство. – 2016. – №1–2. – С.23–27.
4. Старишко, И.Н. Совершенствование методики расчета изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям / И.Н. Старишко // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – №5. – С.31–40.
5. Снежкина, О.В. Оценка каркасно-стержневых моделей для определения трещиностойкости коротких балок / О.В. Снежкина, Ю.П. Скачков, Р.А. Ладин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – № 1 (22). – С. 101–104.
6. Скачков, Ю.П. Определение схем разрушения и трещинообразования коротких железобетонных балок по экспериментальным данным / Ю.П. Скачков, О.В. Снежкина, М.В. Кочеткова, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 74–81.
7. Снежкина, О.В. Прочность наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента / О.В. Снежкина, А.И. Шеин, К.М. Стешин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4(53). – С. 59–65.
8. 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.
9. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38) – С. 119–123.
10. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Yu.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>

11. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, no. 9. – P. 375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>

### References

1. Kodysh, E.N. Improvement of the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Terkin // Industrial and civil construction. – 2016. – No. 6. – P.25–28.
2. 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 planning and architecture. – 2017. – Vol. 7, No. 4. – P. 25–31.
3. Mirsayapov, Il.T. Ensuring the safety of reinforced concrete beams along an inclined section under repeated loads / Il.T. Mirsayapov // Housing construction. – 2016. – №1–2 – P.23–27.
4. Starishko, I.N. Improvement of the methodology for calculating bending reinforced concrete elements along inclined sections / I.N. Starishko // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 5. – P.31–40.
5. Snezhkina, O.V. Evaluation of frame-bar models to determine the fracture toughness of short beams / O.V. Snezhkina, Yu.P. Skachkov, R.A. Ladin // Regional architecture and engineering. – 2015. – No. 1 (22). – P. 101–104.
6. Skachkov, Yu.P. Determination of fracture and cracking patterns of short reinforced concrete beams based on experimental data / Yu.P. Skachkov, O.V. Snezhkina, M.V. Kochetkova, A.V. Kornukhin // Regional architecture and engineering. – 2013. – No. 3. – P. 74–81.
7. Snezhkina, O.V. Strength of an inclined section of a bending reinforced concrete element / O.V. Snezhkina, A.I. Shein, K.M. Steshin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 59–65.
8. Krylov, S.B. Strength model of 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.
9. Garkina, I.A. A unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – No. 1 (38). – P. 119–123.
10. Garkina, I.A. Modeling of building materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, Yu.P. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
11. Danilov, A.M. Coherence function in analysis and synthesis of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, no. 9. – P. 375–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.5236>

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.16

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_145

*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

*Самарский государственный технический университет*

Россия, 440028, г. Самара,  
ул. Молодогвардейская, д.244,  
тел.: (846)278-43-53; факс: (846) 278-44-00

**Чертес Константин Львович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Химические технологии  
и промышленная экология»

*Волгоградский государственный технический университет*

Россия, 400074, Волгоград,  
ул. Академическая, 1,  
тел.: 8(442) 96-99-13

**Игнаткина Дарья Олеговна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение  
и водоотведение»  
E-mail: dashaignatkina@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

**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

*Samara State Technical University*

Russia, 443100, Samara,  
244, Molodogvardeyskaya St.,  
tel.: (846)278-43-53; fax: (846) 278-44-00

**Chertes Konstantin Lvovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Chemical Technologies and  
Industrial Ecology»

*Volgograd State Technical University*

Russia, 400074, Volgograd,  
1, St. Academic,  
tel.: 8(442) 96-99-13

**Ignatkina Daria Olegovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Water Supply and  
Sewerage»  
E-mail: dashaignatkina@mail.ru

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Б.М. Гришин, М.В. Бикунова, К.Л. Чертес, Д.О. Игнаткина

Предложена технология очистки артезианской воды с повышенным содержанием железа, цветности и минеральных солей, включающая предварительную обработку исходной воды гипохлоритом натрия, аэрацию, высокоградиентное перемешивание водовоздушной смеси в вихревом смесителе, механическое фильтрование, сорбцию и обессоливание на установке обратного осмоса. На основании результатов экспери-

ментальных исследований определены оптимальные дозы гипохлорита натрия, относительного объёмного воздушнонасыщения водовоздушной смеси после аэрации подземной воды, а также величины градиента скорости в вихревом смесителе. Предлагаемая технология обеспечивает экономию реагента-окислителя и может быть реализована с применением блочно-модульного оборудования.

*Ключевые слова:* подземная вода, солесодержание, общее железо, цветность, окисление примесей, механическая и сорбционная очистка, обратный осмос

## DEVELOPMENT OF PURIFYING TECHNOLOGY FOR GROUNDWATER WITH HIGH CONTENT OF ORGANIC AND MINERAL IMPURITIES

B.M. Grishin, M.V. Bikunova, K. L. Chertes, D.O. Ignatkina

A technology for purifying artesian water with high iron, color and mineral salt content is proposed, including its preliminary treatment with sodium hypochlorite, aeration, high-gradient mixing of the water-air mixture in a vortex mixer, mechanical filtration, sorption and desalination in a reverse osmosis unit. Based on the results of experimental studies, optimal doses of sodium hypochlorite have been determined relative to volumetric air saturation of the water-air mixture after aeration of underground water, as well as the magnitude of the velocity gradient in the vortex mixer. The proposed technology ensures savings in the oxidizing reagent and can be implemented using block-modular equipment.

*Keywords:* groundwater, salinity, total iron, color, oxidation of impurities, mechanical and sorption purification, reverse osmosis

Источниками водоснабжения для локальных объектов, таких, как загородные турбазы, санатории и дома отдыха, как правило, являются артезианские скважины, обеспечивающие доступ к подземным водоносным горизонтам [1, 2, 3]. На подобных объектах устраиваются децентрализованные системы водоснабжения, не связанные с городскими сетями водопровода.

Качество воды, забираемой из артезианских скважин, обычно высокое, но при необходимости вода может нуждаться в дополнительной очистке от железа, солей жёсткости, цветности или других примесей. Децентрализованные системы водоснабжения требуют регулярного обслуживания, включая анализ качества воды, профилактику оборудования и ремонт в случае поломок. Стоимость обустройства и эксплуатации такой системы является высокой первоначально, но в долгосрочной перспективе может оказаться экономически выгоднее, чем постоянные платежи за централизованное водоснабжение, особенно в случаях удаленного расположения объекта и больших объемов потребления воды.

Выбор той или иной технологии очистки подземных вод, используемых для конкретной децентрализованной системы водоснабжения, может оказать значительное влияние на условия работы и стоимость эксплуатации локального объекта в целом [4, 5]. Поэтому выбор рациональной технологии водоподготовки должен основываться на данных предварительных экспериментальных исследований и применении прогрессивных методов улучшения качества воды природных источников.

Настоящая статья посвящена исследованиям, связанным с разработкой технологии очистки подземных вод, имеющих повышенные концентрации органических и минеральных примесей, для системы питьевого водоснабжения загородной базы отдыха в Волгоградской области. На территории базы отдыха имеются две артезианские скважины. Показатели качества подземной воды, забираемой скважинами, приведены в таблице.

В ходе исследования подземных вод были обнаружены значительные превышения концентраций по таким показателям, как общая минерализация, общая жесткость, содержание общего железа, цветность, а также уровень содержания хлоридов и сульфатов, что делает невозможным использование исходной воды для хозяйственно-питьевых нужд без предварительной очистки.

## Показатели качества воды из подземного источника

№ п/п	Наименование определяемого показателя	Единица измерения	Результаты испытаний	Значение по СанПиН 2.1.3684-21	НД на методы испытаний
<b>Органолептический анализ</b>					
1	Запах воды при 20°C	балл	1	не более 2	ГОСТ Р 57164-2016
2	Привкус воды	балл	3	не более 2	
3	Цветность	град цветности	36 ± 7	не более 20	ГОСТ 31868-2012
4	Мутность	мг/дм <sup>3</sup>	0,90 ± 0,18	не более 1,5	ПНД Ф 14.1:2:3:4.213-05
<b>Санитарно-гигиенические исследования</b>					
5	Водородный показатель рН	ед. рН	6,8	6,0 – 9,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97
6	Общая минерализация (сухой остаток)	мг/дм <sup>3</sup>	3611	не более 1500	ПНД Ф 14.1:2:4.114-97
7	Перманганатная окисляемость	мгО/дм <sup>3</sup>	2,9	не более 7,0	ГОСТ Р 55684-2013
8	Жесткость общая	°Ж	29,7	не более 10,0	ГОСТ 31954-2013 п.4
9	Содержание хлоридов	мг/дм <sup>3</sup>	1471,7	не более 350,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 (М 01-58 2018)
10	Содержание сульфатов	мг/дм <sup>3</sup>	600,0	не более 500,0	
11	Содержание нитратов	мг/дм <sup>3</sup>	7,4	не более 45,0	
12	Массовая концентрация железа (общее)	мг/дм <sup>3</sup>	1,8	не более 0,3	ПНД Ф 14.1:2:4.50-96
13	Содержание нитритов	мг/дм <sup>3</sup>	меньше 0,003*	не более 3,0	ГОСТ 33045-2014
14	Содержание аммиака	мг/дм <sup>3</sup>	меньше 0,01*	не более 2,0	
15	Содержание фтора	мг/дм <sup>3</sup>	0,16 ± 0,01	не более 1,5	ГОСТ 4386-89
16	Содержание марганца	мг/дм <sup>3</sup>	меньше 0,01*	не более 0,1	ГОСТ 4974-2014
17	Содержание меди	мг/дм <sup>3</sup>	меньше 0,02*	не более 1,0	ГОСТ 4388-72

Примечание. Результаты физико-химических измерений представлены на основании среднего арифметического значения серии исследований по двум параллельным определениям. Измерения цветности проведены по хромокобальтовой шкале при температуре (20±5) °С.

\*Нижний предел количественного определения согласно нормативной документации на метод исследования

Наибольшие трудности при очистке воды представляет удаление солей – сульфатов, хлоридов, карбонатной жесткости. Вода, подаваемая на установки обессоливания, должна иметь минимальные концентрации взвеси, железа, а также цветность, не превышающую 30 град. В исходной подземной воде мутность весьма незначительна (0,9 мг/л), однако за счёт возможного контакта с воздухом растворённое железо (концентрацией 1,8 мг/л) способно окисляться до трёхвалентного состояния с образованием хлопьев, что вместе с повышенной цветностью (36 град) повлечёт за собой ухудшение условий для процесса удаления из воды минеральных солей.

Таким образом, на первой ступени очистки подземной воды, предназначенной для хозяйственно-питьевых целей базы отдыха, должны быть удалены растворённое железо и избыточная цветность. Наиболее часто растворённое железо удаляется методом аэрации, а избыточная цветность – коагулянтами либо окислителями (озоном или хлорсодержащими реагентами). Так как очищенную воду перед подачей потребителю в любом случае нужно обеззараживать, то для упрощения технологической

схемы очистки и снижения эксплуатационных затрат на обслуживание реагентного хозяйства для предварительной обработки воды и обеззараживания было предложено использовать один реагент – гипохлорит натрия. В целях ускорения процесса окисления растворённого железа и примесей, обуславливающих цветность, в экспериментах осуществлялась аэрация подземной воды пузырьками воздуха с различной степенью дисперсности. Для перемешивания гипохлорита натрия и воздуха с исходной водой использовался вихревой смеситель, конструкция которого приведена в работе [5]. Схема экспериментальной установки, на которой исследовался процесс предварительной очистки подземной воды от растворённого железа и цветности, показана на рис. 1.

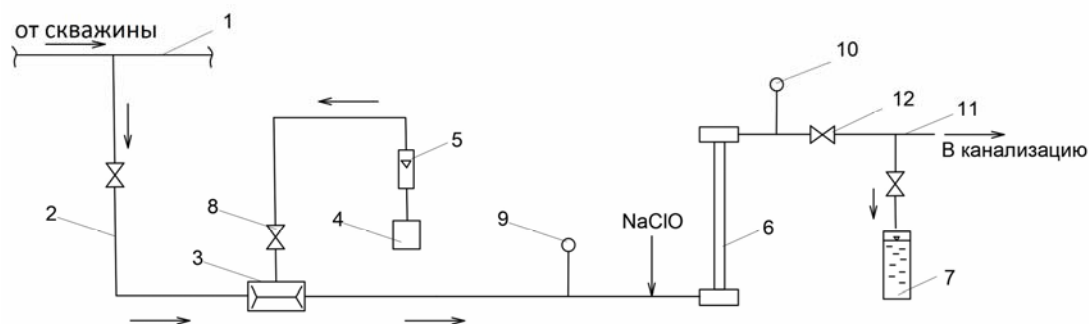


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – напорный трубопровод; 2 – труба для подачи подземной воды на обработку; 3 – трубка Вентури; 4 – компрессор; 5 – ротаметр; 6 – вихревой смеситель; 7 – ёмкость для отбора проб; 8 – воздушный вентиль; 9, 10 – манометры; 11 – сбросная труба; 12 – регулирующий вентиль

Обработка подземной воды в процессе испытаний осуществлялась следующим образом. Вода из напорного трубопровода 1 артезианской скважины через трубу ответвления 2 проходила через трубку Вентури 3. Расход воздуха, поступающего из компрессора 4 в трубку Вентури, измерялся ротаметром 5 и регулировался вентилем 8. Полученная водовоздушная смесь под остаточным напором поступала в вихревой смеситель 6, в котором осуществлялись интенсивное диспергирование пузырьков воздуха и перемешивание потока с раствором гипохлорита натрия  $\text{NaClO}$ , который насосом-дозатором вводился в трубопровод перед вихревым смесителем. Отобранные пробы воды собирались в ёмкость 7 и далее пропускались через бумажный фильтр. В полученном фильтрате определялись концентрации остаточного железа и цветность в соответствии с принятыми методиками нормативных документов. Перепад давлений в вихревом смесителе при прохождении через него водовоздушной смеси измерялся по разнице показаний манометров 9 и 10, а расход изменялся с помощью вентилем 12. Расход жидкой фазы водовоздушной смеси определялся объёмным методом на сливе из сбросной трубы 11 до момента отбора проб. Дозы гипохлорита натрия ( $D_{\text{хл}}$ ) изменялись от 0,3 до 1,2 мг/л. Интенсивность перемешивания подземной воды с гипохлоритом натрия и пузырьками воздуха в вихревом смесителе оценивалась по величине градиента скорости, определяемого по формуле

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p}{\mu_c \cdot t}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – перепад давлений в вихревом смесителе, Па;  $t$  – время перемешивания,  $t=2-3$  с;  $\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости водовоздушной смеси, Па·с,

$$\mu_c = \mu(1 - 4,5\varphi); \quad (2)$$

здесь  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воды,  $\mu=10^{-3}$  Па·с;  $\varphi$  – относительное объёмное воздухомышение смеси,

$$\varphi = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{в}} + Q}; \quad (3)$$

здесь  $Q_v$  и  $Q$  – соответственно расходы воздуха и воды в потоке водовоздушной смеси.

Величины  $\varphi$  в экспериментах изменялись в пределах от 0,05 до 0,2, а значения градиента скорости варьировались от 800 до 1300  $\text{с}^{-1}$ . Результаты испытаний по удалению из подземной воды общего железа и цветности представлены на рис. 2-5. Полученные экспериментальные данные показали, что дополнительная аэрация воды позволяет улучшить качество её предварительной очистки при реагентной обработке гипохлоритом натрия. Интенсификация процесса окисления примесей воды при возрастании градиента скорости может быть объяснена более высокой степенью диспергирования пузырьков воздуха в вихревом смесителе, что позволило увеличить площадь контакта водной и воздушной фаз и ускорить массообменные процессы.

Для снижения концентрации железа в воде до 0,3 мг/л установлены наиболее рациональные параметры обработки (см. рис. 3):

$$G=950 \text{ с}^{-1}, \varphi=0,1, D_{\text{хл}}=1,2 \text{ мг/л};$$

$$G=800 \text{ с}^{-1}, \varphi=0,2, D_{\text{хл}}=1,2 \text{ мг/л};$$

$$G=930 \text{ с}^{-1}, \varphi=0,2, D_{\text{хл}}=0,9 \text{ мг/л}.$$

При удалении цветности величина градиента скорости оказывала более значимое влияние на качество очистки по сравнению с величиной воздухомасштащения. Найдены оптимальные параметры обработки с целью обесцвечивания воды (см. рис. 5):  $G > 930 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,1 - 0,2$ ,  $D_{\text{хл}}=0,9 - 1,2 \text{ мг/л}$ . На основании анализа полученных данных для эффективного удаления растворённого железа и цветности было рекомендовано проводить предварительную обработку подземной воды гипохлоритом натрия с дозой  $D_{\text{хл}}=1,2 \text{ мг/л}$  с последующей её аэрацией пузырьками воздуха в вихревом смесителе при градиенте скорости  $G=950 \text{ с}^{-1}$  и воздухомасштащении  $\varphi=0,1$ . Для обеспечения такой же степени очистки воды от железа и цветности без аэрации требуемые дозы  $\text{NaClO}$  находились в пределах 1,5 – 1,7 мг/л. Что касается обессоливания воды с повышенной минерализацией, то для этой цели был выбран метод обратного осмоса, так как СНиП 2.04.02–84 ограничивает применение метода ионного обмена максимальной концентрацией солей в исходной воде, не превышающей 1500 – 2000 мг/л.

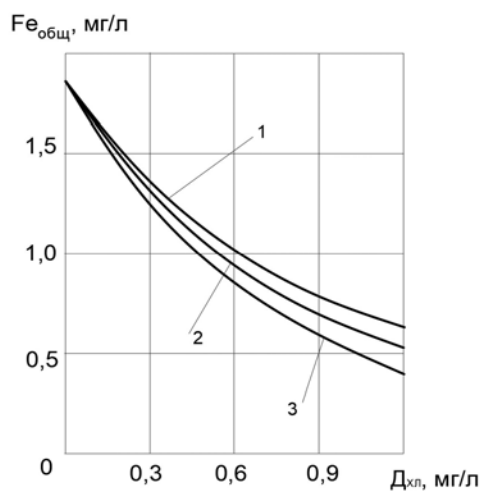


Рис. 2. Графики зависимостей концентрации общего железа в очищенной воде от дозы гипохлорита натрия с обработкой в вихревом смесителе без воздуха при значениях градиента скорости  $G$ :

1 – 820  $\text{с}^{-1}$ ; 2 – 1110  $\text{с}^{-1}$ ; 3 – 1300  $\text{с}^{-1}$

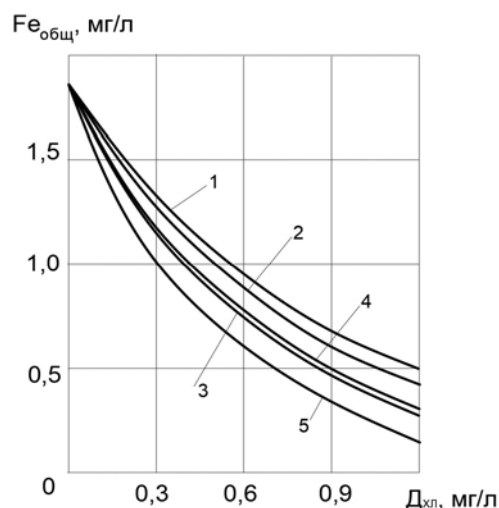


Рис.3. Графики зависимостей концентрации общего железа в очищенной воде от дозы гипохлорита натрия при параметрах обработки водовоздушной смеси в вихревом смесителе:

1 –  $G=1000 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,05$ ; 2 –  $G=830 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,1$ ;

3 –  $G=950 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,1$ ; 4 –  $G=800 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,2$ ;

5 –  $G=930 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,2$

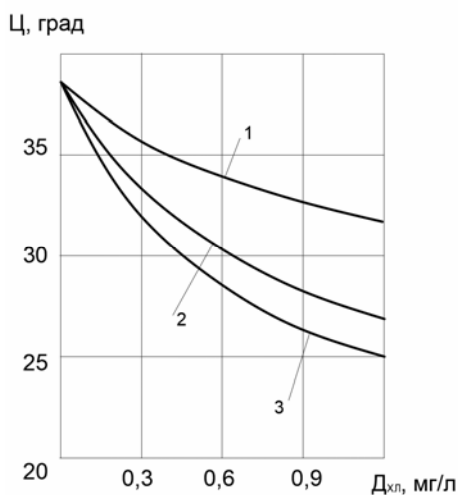


Рис. 4. Графики зависимостей остаточной цветности в очищенной воде от дозы гипохлорита натрия с обработкой в вихревом смесителе без воздуха при значениях градиента скорости  $G$ :

1 –  $820 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $1110 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $1300 \text{ с}^{-1}$

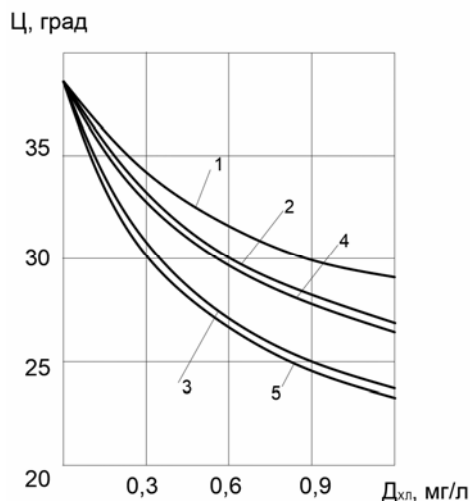


Рис.5. Графики зависимостей остаточной цветности в очищенной воде от дозы гипохлорита натрия при параметрах обработки водовоздушной смеси в вихревом смесителе:

1 –  $G=1000 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,05$ ; 2 –  $G=830 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,1$ ;  
3 –  $G=950 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,1$ ; 4 –  $G=800 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,2$ ;  
5 –  $G=930 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi=0,2$

По результатам экспериментальных исследований с учётом требований СНиП 2.04.02–84 для хозяйственно-питьевого водоснабжения базы отдыха была рекомендована схема водоподготовки, представленная на рис. 6.

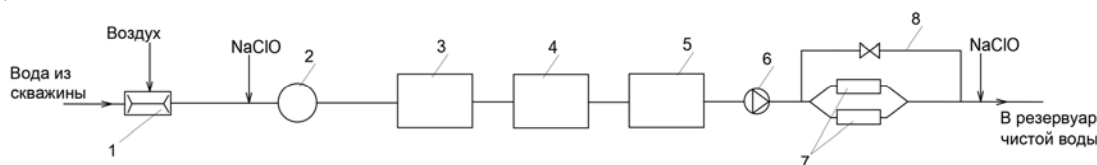


Рис. 6. Технологическая схема очистки подземной воды с повышенной минерализацией: 1 – труба Вентури; 2 – вихревой смеситель; 3 – механический фильтр; 4 – сорбционный фильтр; 5 – промежуточный резервуар; 6 – насос; 7 – установка обратного осмоса; 8 – обводная линия

В соответствии с предложенной схемой вода из скважины после насыщения воздухом, подаваемым компрессором в трубу Вентури 1, и обработки гипохлоритом натрия направляется в вихревой смеситель 2, где происходит окисление примесей, обусловленных присутствием общего железа и цветности. Затем вода поступает на безнапорный механический фильтр 3, где задерживается образовавшаяся тонкодисперсная взвесь. Вода после фильтрования может содержать остаточные концентрации гипохлорита натрия, который негативно воздействует на мембраны обратноосмотической установки, поэтому после механического фильтра требуется установка сорбционного фильтра 4. Далее предварительно очищенная вода поступает в промежуточный резервуар 5, откуда насосом 6 перекачивается на установку обратного осмоса 7 и после вторичной обработки раствором  $\text{NaClO}$  (в целях обеззараживания) поступает в резервуар чистой воды. Так как после установки 7 вода практически не содержит солей, то для обеспечения минимального содержания минералов, требуемых для поддержания здоровья потребителей, часть расхода воды пропускается через обводную линию 8. Расход, идущий через обводную линию, рассчитывается на основе применения уравнения солевого баланса с учётом требований СанПиН 2.1.3684-21 к максимально допустимой концентрации анионов в питьевой воде.



Предлагаемая технология может быть реализована в блочно-модульном исполнении, обеспечивающем минимизацию производственных площадей, необходимых для размещения оборудования.

### ВЫВОДЫ

1. Аэрация обработанной гипохлоритом натрия воды подземного источника с последующим интенсивным перемешиванием водовоздушной смеси в вихревом смесителе позволяет ускорить процессы окисления растворённого железа и примесей, обуславливающих повышенную цветность воды, с одновременным снижением требуемых доз гипохлорита натрия.

2. Для эффективного снижения концентрации растворённого железа и величины цветности в процессе предварительной очистки артезианской воды найдены следующие оптимальные параметры её обработки: доза гипохлорита натрия – 1,2 мг/л, относительное объёмное воздухомышение смеси – 0,1, градиент скорости водовоздушного потока в вихревом смесителе – 950 с<sup>-1</sup>.

3. Предложена реагентосберегающая технологическая схема очистки подземной воды с повышенной минерализацией для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения локального объекта (базы отдыха), включающая механическую, сорбционную и обратноосмотическую ступени с возможностью использования блочно-модульного оборудования.

### Список литературы

1. Cosgrove, W.J. Water Resources management: current and future issues and research directions / W.J. Cosgrove, D.P. Luks // *Water Resources Research*. – 2015. – 51. – 4823-4839.
2. Keller, J. Why are decentralised urban water solutions still rare given all the claimed benefits, and how could that be changed? / J. Keller // *Water Research: X*. – 2023. – 19. – 100180 CAS.
3. Lakho, F. H. Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration / F.H. Lakho, H.Q. Le, F. Mattheeuws, W. Igodt, V. Depuydt, J. Desloover, D.P.L. Rousseau and S.W.H. Van Hulle // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – 9. – 104688.
4. Castellar, J.A.C. Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities / J.A.C. Castellar, A. Torrens, G. Buttiglieri, H. Monclús, C.A. Arias, P.N. Carvalho, A. Galvao and J. Comas, // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – 340. – 130660 CrossRef.
5. Garrido-Baserba, M. The Third way: a technical and economic assessment of extreme decentralization of water supply and sanitation / M. Garrido-Baserba, I. Barnosell, M. Molinos-Senate, D. L. Sedlak, K. Rabey, O. Schraa, M. Verdager, D. Rosso and M. Poh // *Water Research*. – 2022. – 218. – 118408.
6. Гришин, Б.М. Технологии реагентной обработки природных вод с применением вихревых смесительных устройств / Б.М. Гришин, И.А. Гарькина, Н.Г. Вилкова, М.В. Бикунова, А.И. Шеин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2016. – №4 (29). – С. 100–107.

### References

1. Cosgrove, W.J. Water Resources management: current and future issues and research directions / W.J. Cosgrove, D.P. Luks // *Water Resources Research*. – 2015. – 51. – 4823-4839.
2. Keller, J. Why are decentralised urban water solutions still rare given all the claimed benefits, and how could that be changed? / J. Keller // *Water Research: X*. – 2023. – 19. – 100180 CAS.

3. Lakho, F. H. Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration / F.H. Lakho, H.Q. Le, F. Mattheeuws, W. Igodt, V. Depuydt, J. Desloover, D.P.L. Rousseau and S.W.H. Van Hulle // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – 9. – 104688.
4. Castellar, J.A.C. Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities / J.A.C. Castellar, A. Torrens, G. Buttiglieri, H. Monclús, C.A. Arias, P.N. Carvalho, A. Galvao and J. Comas, // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – 340. – 130660 CrossRef.
5. Garrido-Baserba, M. The Third way: a technical and economic assessment of extreme decentralization of water supply and sanitation / M. Garrido-Baserba, I. Barnosell, M. Molinos-Senate, D. L. Sedlak, K. Rabey, O. Schraa, M. Verdager, D. Rosso and M. Poh // *Water Research*. – 2022. – 218. – 118408.
6. Grishin, B.M. Technologies of reagent treatment of natural waters using vortex mixing devices / B.M. Grishin, I.A. Garkina, N.G. Vilkova, M.V. Bikunova, A.I. Shein // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – No. 4 (29). – P. 100–107.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_153

*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

**Андреев Сергей Юрьевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Сафронов Максим Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Лебединский Константин Валерьевич,**  
кандидат технических наук,  
зав. кафедрой «Транспортные машины»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Алексеев Дмитрий Петрович,**  
ведущий инженер кафедры «Транспортные  
машины»  
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

*Пензенский государственный  
технологический университет*  
Россия, 440039, г. Пенза,  
проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11,  
тел.: (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

**Марынов Иван Викторович,**  
студент  
E-mail: imarynov@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

**Andreev Sergey Yuryevich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
of the Department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Safronov Maxim Aleksandrovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,  
tel.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Lebedinskiy Konstantin Valerevich,**  
Candidate of Sciences, Head of the  
department «Transport Machines»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Alekseev Dmitriy Petrovich,**  
Lead engineer of the department «Transport  
Vehicles»  
E-mail: alekseev.dim@gmail.com  
*Penza State Technological University*

Russia, 440039, Penza, Pr. Baidukova/Ul.  
Gagarina, 1a/11,  
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

**Marynov Ivan Viktorovich,**  
Student  
E-mail: imarynov@yandex.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ УСТАНОВКИ ВИХРЕВОЙ САТУРАЦИИ

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, К.В. Лебединский,  
Д.П. Алексеев, И.В. Марынов

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса работы полупромышленной установки вихревой сатурации. Показано, что в процессе работы установки в режиме подсосывания атмосферного воздуха во входной патрубок центробежного насоса, подающего рециркулирующий поток жидкости в вихревое сатурационное устройство, образуется водовоздушная смесь, содержащая пузырьки воздуха наименьшего размера, при этом величина коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси имеет значение  $\varphi = 0,0019-0,0116$ . При реализации технического приема подсосывания атмосферного воздуха во входной патрубок центробежного насоса величина удельной массовой диссипации энергии в вихревом сатурационном устройстве имеет значение  $\varepsilon_m = 111 - 445$  Дж/кг, величина избыточного давления изменяется в пределах  $\Delta P = 0,1 - 0,4$  МПа, при этом величина коэффициента эффективности работы сатуратора составляет  $\varepsilon_c = 8,0-13,6$  %. Установлено, что проток жидкости через бак-классификатор фракций пузырьков воздуха водовоздушной смеси при отношении расхода проточной жидкости  $Q_{\text{ж}}$  к расходу рециркуляционного потока  $Q_{\text{р}}$ , имеющем величину  $Q_{\text{ж}}/Q_{\text{р}}=1,39$ ,

несущественно снижает технологические показатели образующейся водовоздушной смеси.

*Ключевые слова:* вихревой сатуратор, коэффициент газонаполнения, гидравлическая крупность, пересыщенный раствор, компрессионная флотация, вакуумная флотация

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A VORTEX SATURATION UNIT OPERATION

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, K.V. Lebedinsky,  
D.P. Alekseev, I.V., Marynov

The results of experimental studies of the operation process of a semi-industrial vortex saturation plant are presented. It is shown that during the operation of the installation in the mode of atmospheric air suction into the inlet pipe of a centrifugal pump supplying a recirculating liquid flow to a vortex saturation device, an air-water mixture containing the smallest air bubbles is formed, while the gas filling coefficient of the air-water mixture has a value of  $\varphi = 0.0019-0.0116$ . When implementing the technical method of sucking atmospheric air into the inlet pipe of a centrifugal pump, the value of the specific mass dissipation of energy in a vortex saturation device has a value of  $\epsilon_m = 111 - 445 \text{ J / kg}$ , the value of the overpressure varies within  $\Delta P = 0.1 - 0.4 \text{ MPa}$ , while the value of the saturator efficiency coefficient has a value of  $E_S = 8.0 - 13.6 \%$ . It has been found that the flow of liquid through the classifier tank of fractions of air bubbles of a water-air mixture with a ratio of the flow rate of the flowing liquid  $Q_w$  to the flow rate of the recirculation flow  $Q_R$  having a value of  $Q_w/Q_R = 0.64 - 1.39$  reduces the technological parameters of the resulting water-air mixture in an insignificant way.

*Keywords:* vortex saturator, gas filling coefficient, hydraulic fineness, supersaturated solution, compression flotation, vacuum flotation

В технологических процессах очистки производственных сточных вод от мелкодисперстных загрязнений широкое распространение получил метод флотации [1, 2, 3]. В основе технологии флотационной очистки производственных сточных вод лежит комплекс процессов динамического взаимодействия двух аквасистем – естественной аквасистемы загрязнений сточных вод, представляющей собой смесь дисперсных частиц и растворенных загрязнений, взаимодействующей с искусственно создаваемой во флотационном объеме аквасистемой – дисперсной газовой фазой (ДГФ). Отделение из производственных сточных вод мелкодисперсных загрязнений происходит в результате последовательного протекания следующих стадий процесса флотационной очистки:

1. Формирование во флотационном объеме флотокомплексов «пузырек воздуха – дисперсная частица загрязнений» вследствие молекулярного прилипания дисперсной частицы к поверхности всплывающего пузырька воздуха.

2. Всплывание образующихся флотокомплексов, имеющих отрицательную гидравлическую крупность, на поверхность флотационного объема.

3. Образование пенного слоя и его удаление с поверхности жидкости.

Вероятность образования флотокомплекса в процессе столкновения всплывающего во флотационном объеме пузырька воздуха с дисперсной частицей загрязнения существенно увеличивается при уменьшении диаметра пузырька воздуха  $d_n$  [3].

В настоящее время широкое распространение в практике флотационной очистки сточных вод получил метод формирования тонкодисперсной водовоздушной смеси путем выделения пузырьков воздуха из пересыщенного водного раствора, образующегося в результате понижения давления в насыщенном воздухом потоке жидкости.

В процессах флотационной очистки пересыщенный раствор воздуха в обрабатываемых сточных водах, как правило, получают двумя способами: напорной флотации и вакуумной флотации.

Насыщение потока очищаемых сточных вод атмосферным воздухом при напорной флотации производится под избыточным давлением  $0,4 - 0,6 \text{ МПа}$  в напорном баке специальной конструкции (сатураторе). Насыщенный воздухом под избыточным давлением поток сточных вод подается во флотационный резервуар (флотатор) через

дроссель – устройство, в котором осуществляется сброс избыточного давления, в результате чего раствор воздуха в воде становится пересыщенным и из него выделяются пузырьки воздуха. Процесс напорной флотации позволяет получить во флотационном объеме водовоздушную смесь с высоким значением коэффициента газонаполнения  $\phi$ , содержащую пузырьки воздуха, имеющие низкую степень дисперсности (эквивалентный диаметр пузырьков  $d_{\text{эк}} = 110\text{--}170$  мкм).

Повышенное значение эквивалентного диаметра пузырьков воздуха, получаемых в процессе напорной флотации, отрицательно сказывается на эффективности процесса флотационной очистки. Другим существенным недостатком процесса напорной флотационной очистки является высокое значение удельных энергозатрат.

В процессе вакуумной флотации насыщение воздухом потока обрабатываемых сточных вод осуществляется при атмосферном давлении. Сточная вода барботируется в аэрационной камере в течение 1–2 минут, после чего насыщенный воздухом поток сточных вод поступает в вакуумную флотационную камеру, где поддерживается разрежение 0,02–0,03 МПа. При пониженном давлении раствор воздуха в воде становится пересыщенным, и из него выделяются тонкодисперсные пузырьки воздуха. Процесс вакуумной флотации позволяет получить во флотационном объеме водовоздушную смесь, содержащую пузырьки воздуха, имеющие существенно меньшие размеры, чем пузырьки воздуха, образующиеся при напорной флотации. Процесс вакуумной флотации требует значительно меньших удельных затрат, чем процесс напорной флотации. Существенным недостатком процесса вакуумной флотации является необходимость строительства герметичных флотационных камер, требующих вложения значительных капитальных затрат и монтажа устройств, поддерживающих на должном уровне вакуум во флотационной камере. К недостаткам процесса вакуумной флотации также относится низкое значение коэффициента газонаполнения  $\phi$  образующейся водовоздушной смеси.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства был разработан метод вихревой сатурации сточных вод, позволяющий совместить основные преимущества процесса напорной флотации (высокое значение коэффициента газонаполнения в водо-воздушной смеси) и процесса вакуумной флотации (малый размер эквивалентного диаметра образующихся пузырьков воздуха и незначительная величина удельных энергозатрат).

В патенте РФ [4] было предложено решение проблемы вихревой сатурации, сущность которой заключается в реализации принципа создания вращательно-поступательного движения восходяще-нисходящих соосных потоков водовоздушной смеси, что позволяет последовательно осуществлять процессы насыщения обрабатываемого потока воздухом при повышенном давлении в периферийной области потока и выделения из пересыщенного раствора мелкодисперсных пузырьков при пониженном давлении в вакуумной приосевой зоне.

На рис. 1 и 2 представлены конструктивная схема и общий вид полупромышленной установки вихревого сатуратора.

Процесс работы полупромышленной установки вихревой сатурации предусматривал проведение трех этапов. На первом этапе исследований атмосферный воздух подсасывался во входную линию центробежного насоса 8 (см. рис. 1). На втором этапе исследований сжатый воздух компрессором 11 подавался во всасывающий патрубок эжектора 12. При проведении третьего этапа исследований атмосферный воздух подсасывался во входную линию центробежного насоса и подавался компрессором в эжектор.

Целью проведения всех этапов исследований являлось определение оптимальных параметров процесса обработки водовоздушной смеси в вихревом сатурационном устройстве, позволяющем получить тонкодисперсную водовоздушную смесь с высоким значением коэффициента газонаполнения при минимальной величине удельных энергозатрат.

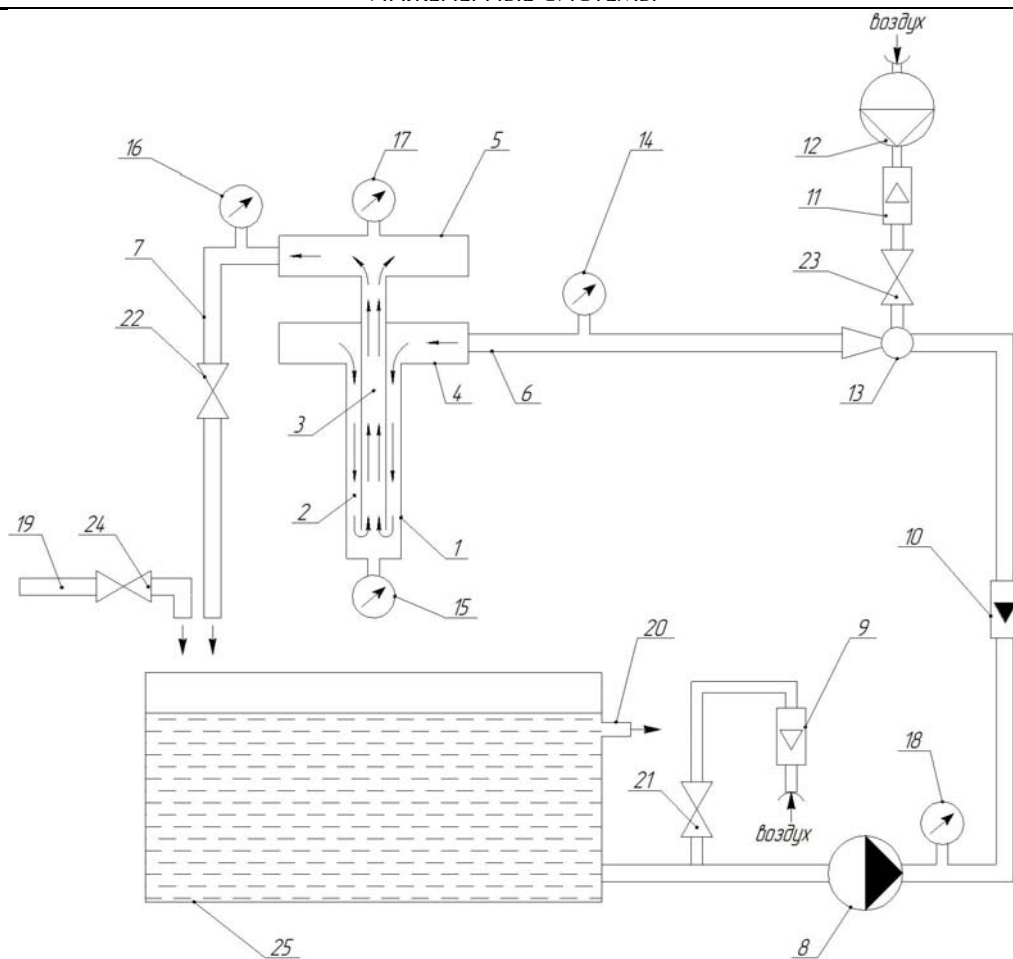


Рис. 1. Конструктивная схема полупромышленной установки вихревого сатуратора:  
 1 – корпус вихревого сатуратора; 2 – кольцевая вихревая камера; 3 – центральная вихревая камера; 4 – камера входа; 5 – камера выхода; 6 – патрубок ввода водовоздушной смеси;  
 7 – патрубок выпуска водовоздушной смеси; 8 – насос; 9, 10, 11 – расходомеры;  
 12 – компрессор; 13 – эжектор; 14, 15, 16, 17, 18 – манометры; 19 – трубопровод подачи воды в бак-классификатор; 20 – трубопровод отвода водовоздушной смеси из бака-классификатора;  
 21, 22, 23, 24 – запорная арматура; 25 – бак-классификатор фракций пузырьков водовоздушной смеси



Рис. 2. Общий вид полупромышленной установки вихревого сатуратора

При проведении первого этапа исследований расход воздуха, подсасываемого во входной патрубок центробежного насоса 8, регулировался вентилем 21 и контролировался расходомером 9. Объемный расход воздуха поддерживался на уровне 10 % от расхода, перекачиваемого насосом 8 воды. Вентиль 24 на трубопроводе подачи водопроводной воды 19 в бак-классификатор фракции водовоздушной смеси 25 был закрыт. Насос 8 перекачивал через вихревой сатуратор 1 рециркуляционный поток, расход которого контролировался расходомером 10. Компрессор 12 при проведении первого этапа исследования был отключен, а вентиль 23 был закрыт.

В ходе проведения данного этапа исследования решались следующие задачи:

1. Определение зависимости величины коэффициента газонаполнения образующейся в объеме классификатора водовоздушной смеси от величины избыточного давления  $\Delta P$  на входе в вихревой сатуратор.

2. Выявление зависимости эффективности процесса обработки водовоздушной смеси в вихревом сатурационном устройстве  $\Xi$ , %, от величины избыточного давления  $\Delta P$ , МПа.

3. Установление влияния величины избыточного давления  $\Delta P$ , МПа, на входе в вихревой сатуратор на степень пересыщения жидкости газом  $n$ , %.

4. Определение влияния величины избыточного давления  $\Delta P$ , МПа, на входе в вихревой сатуратор на среднее значение гидродинамической крупности пузырьков воздуха  $U$ , мм/с, образующихся в объеме бака-классификатора водовоздушной смеси.

5. Расчет значений среднего диаметра пузырьков воздуха  $d_p$ , мкм, водовоздушной смеси, образующихся в объеме бака-классификатора.

Водовоздушная смесь отбиралась из объема бака-классификатора фракции 25, предназначенного для отделения нерастворившихся крупнодисперсных пузырьков воздуха, и проводился анализ ее характеристик.

Общий вид водовоздушной смеси, сформированной при величине избыточного давления  $\Delta P = 0,3$  МПа, отобранной из бака-классификатора, представлен на рис. 3.

Величина избыточного давления в водовоздушной смеси  $\Delta P$ , подаваемой на вихревой сатуратор 1, контролировалась манометром 14 и изменялась с помощью вентилей 22.

Технологические характеристики водовоздушной смеси, получаемой на первом этапе исследований процесса работы установки вихревой сатурации, представлены в форме табл. 1.



Рис. 3. Общий вид водовоздушной смеси, сформированной при величине избыточного давления  $\Delta P = 0,3$  МПа

Т а б л и ц а 1

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученные на первом этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации

Наименование показателя	Величина показателя						
1	2						
Избыточное давление водовоздушной смеси, подаваемой в вихревой сатуратор $\Delta P$ , МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Расход жидкости, подаваемой в сатуратор $Q_{ж}$ , м <sup>3</sup> /ч	1,56	1,44	1,26	1,14	0,96	0,84	0,72

1	2						
Удельная массовая диссипация энергии в вихревом сатураторе $\varepsilon_m$ , Дж/кг, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	111	169	223	278	334	390	445
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси $\varphi$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,0019	0,0037	0,0055	0,0075	0,0090	0,0103	0,0116
Теоретическая величина объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси при полном насыщении воды воздухом $C_w$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Коэффициент эффективности работы сатуратора $\Theta_c$ , %	9,5	12,3	13,8	15,0	15,0	14,7	14,5
Степень пересыщения жидкости газом $n$ , %	9,5	18,5	27,5	27,5	45,0	51,5	58,0
Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $U$ , мм/с	5,7	5,5	5,2	5,0	4,6	3,7	2,5
Кинематический коэффициент вязкости водовоздушной смеси $\nu_{cm}$ , м <sup>2</sup> /(с·10 <sup>-6</sup> )	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
Средний диаметр пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $d_{п.}$ , мкм	103	102	100	98	95	85	70

В качестве показателя удельных энергозатрат в процессе сатурации была принята величина удельной массовой диссипации энергии в вихревом сатурационном устройстве  $\varepsilon_m$ , Дж/кг:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta P}{\rho(1-\varphi_c)}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – величина избыточного давления в водовоздушной смеси, подаваемой на вихревой сатуратор, Па;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi_c$  – коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси, подаваемой в сатуратор ( $\varphi_c = 0,09$ ).

Величина коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси, отбираемой из объема бака-классификатора в стандартный мерный цилиндр, определялась по формуле

$$\varphi = \frac{W_{cm} - W_{ж}}{W_{cm}} = \frac{H_{cm} - H_{ж}}{H_{cm}}, \quad (2)$$

где  $W_{cm}$  – объем водовоздушной смеси в мерном цилиндре, м<sup>3</sup>;  $W_{ж}$  – объем жидкости в мерном цилиндре после выделения из нее пузырьков воздуха, м<sup>3</sup>;  $H_{cm}$  – высота



столба водовоздушной смеси в мерном цилиндре, м;  $H_{\text{ж}}$  – высота столба жидкости в мерном цилиндре после выделения из нее пузырьков воздуха, м.

Теоретическая величина объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси при полном насыщении воды воздухом определялась по формуле

$$C_w = C_{wa} \frac{P_a + \Delta P}{P_a} - C_{wa} = C_{wa} \left( \frac{P_a + \Delta P}{P_a} - 1 \right), \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}, \quad (3)$$

где  $P_a$  – величина атмосферного давления;  $C_{wa}$  – объемная концентрация насыщения воды воздухом при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и давлении  $P_a = 0,1$  МПа,

$$C_{wa} = \frac{C_a}{\rho_{\text{в}}} = \frac{23,6 \cdot 10^{-3}}{1,2} = 0,02 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \quad (4)$$

здесь  $C_a = 23,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  – концентрация насыщения воды воздухом при давлении воздуха  $P_a = 0,1$  МПа;  $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

Величина коэффициента эффективности работы вихревого сатуратора вычислялась по формуле

$$\Xi_c = \frac{\Phi}{C_{wa}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Степень пересыщения жидкости газом в сатураторе находили по формуле

$$n = \frac{\Phi}{C_a} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха  $U$  (мм/с) определялась с учетом скорости движения фронта раздела фаз «водовоздушная смесь – вода» в мерном цилиндре:

$$U = \frac{\Delta H_{\text{см}}}{\Delta T}, \text{ мм/с}, \quad (7)$$

где  $\Delta H_{\text{см}}$  – расстояние, которое прошел фронт раздела фаз «водовоздушная смесь – вода» в мерном цилиндре за время  $\Delta T$ , с.

Величина кинематического коэффициента вязкости водовоздушной смеси вычислялась в соответствии с уравнением

$$\nu_{\text{см}} = \nu_{\text{ж}} \frac{1 + \frac{9}{2} \cdot \Phi}{1 - \Phi}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (8)$$

где  $\nu_{\text{ж}} = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – величина кинематического коэффициента вязкости воды при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Величина среднего диаметра пузырьков воздуха водовоздушной смеси определялась по формуле Стокса, учитывающей зависимость скорости всплывания  $V_c$  (м/с) в воде сферического тела диаметром  $d_c$  (м):

$$V_c = \frac{g \cdot d_c^2}{18 \cdot \nu_{\text{ж}}} \cdot \frac{\rho - \rho_{\text{в}}}{\rho} = \frac{9,8 \cdot d_c^2}{18 \cdot \nu_{\text{ж}}} \cdot \frac{998,2 - 1,2}{998,2} = 0,544 \frac{d_c^2}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (9)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Откуда

$$d_c = \sqrt{1,838 \cdot V_c \cdot v_{ж}}, \text{ м}, \quad (10)$$

и

$$d_{п} = 10^6 \sqrt{1,838 \cdot (U_0 \cdot 10^{-3}) \cdot v_{см}}, \text{ мкм}. \quad (11)$$

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученной на втором этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации, представлены в форме табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученной на втором этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации

Наименование показателя	Величина показателя						
Избыточное давление водовоздушной смеси, подаваемой в вихревой сатуратор $\Delta P$ , МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Удельная массовая диссипация энергии в вихревом сатураторе $\varepsilon_m$ , Дж/кг, $\text{м}^2/\text{с}^2$	111	167	223	278	334	390	445
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси $\phi$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	0,0018	0,0036	0,0053	0,0074	0,0086	0,0097	0,0110
Теоретическая величина объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси при полном насыщении воды воздухом $C_w$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Коэффициент эффективности работы сатуратора $\Xi_c$ , %	9,0	12,0	13,2	14,8	14,6	13,9	13,7
Степень пересыщения жидкости газом $n$ , %	9,0	18,0	26,5	37,0	43,0	48,5	55,0
Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $U$ , мм/с	6,3	5,8	5,5	5,1	4,8	4,0	3,2
Кинематический коэффициент вязкости водовоздушной смеси $\nu_{см}$ , $\text{м}^2/(\text{с} \cdot 10^{-6})$	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,06	1,08
Средний диаметр пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $d_{п}$ , мкм	109	105	103	99	97	88	80

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученные на третьем этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации, представлены в форме табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученные на третьем этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации

Наименование показателя	Величина показателя						
Избыточное давление водовоздушной смеси, подаваемой в вихревой сатуратор $\Delta P$ , МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Удельная массовая диссипация энергии в вихревом сатураторе $\varepsilon_m$ , Дж/кг, $\text{м}^2/\text{с}^2$	111	167	223	278	334	390	445
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси $\varphi$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	0,0020	0,0038	0,0056	0,0077	0,0091	0,0104	0,0117
Теоретическая величина объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси при полном насыщении воды воздухом $C_w$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Коэффициент эффективности работы сатуратора $\Xi_c$ , %	10,0	12,7	14,0	15,4	15,2	14,8	14,6
Степень пересыщения жидкости газом $n$ , %	10,0	19,0	28,0	38,5	45,5	52,0	58,5
Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $U$ , мм/с	6,8	6,1	5,6	5,2	4,8	4,2	3,8
Кинематический коэффициент вязкости водовоздушной смеси $\nu_{см}$ , $\text{м}^2/(\text{с} \cdot 10^{-6})$	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08	1,08
Средний диаметр пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $d_{пв}$ , мкм	113	108	103	100	97	91	87

С целью выявления степени влияния протока жидкости через бак-классификатор фракций пузырьков водовоздушной смеси исследования первого этапа процесса работы установки вихревой сатурации были проведены при подаче в бак-классификатор водопроводной воды с расходом  $Q_{ж} = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученные на первом этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации, работающей в режиме протока воды через бак-классификатор, представлены в форме табл. 4.

Технологические характеристики водовоздушной смеси, полученные на первом этапе исследования процесса работы установки вихревой сатурации, работающей в режиме протока воды через бак-классификатор

Наименование показателя	Величина показателя						
Избыточное давление водо-воздушной смеси подаваемый в вихревой сатуратор $\Delta P$ , МПа	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Отношение расхода проточной жидкости на выходе из бака-классификатора $Q_{\text{ж}}$ к расходу рециркуляционного потока $Q_{\text{р}}$ , м <sup>3</sup> /ч	0,64	0,69	0,79	0,88	1,04	1,11	1,39
Удельная массовая диссипация энергии в вихревом сатураторе $\varepsilon_m$ , Дж/кг, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	111	167	223	278	334	390	445
Коэффициент газонаполнения водовоздушной смеси $\varphi$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,0016	0,0032	0,0051	0,0072	0,0086	0,0097	0,0109
Теоретическая величина объемной концентрации воздуха в водовоздушной смеси при полном насыщении воды воздухом $C_w$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Коэффициент эффективности работы сатуратора $\Xi_c$ , %	8,0	10,7	12,8	14,4	14,3	13,9	13,6
Степень пересыщения жидкости газом $n$ , %	8,0	16,0	25,5	36,0	43,0	48,5	54,5
Средняя величина гидравлической крупности пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $U$ , мм/с	6,2	5,9	5,5	5,2	4,8	4,2	3,1
Кинематический коэффициент вязкости водовоздушной смеси $\nu_{\text{см}}$ , м <sup>2</sup> /(с·10 <sup>-6</sup> )	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08	1,08
Средний диаметр пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $d_{\text{п}}$ , мкм	108	106	103	100	97	91	78

Проведенные экспериментальные исследования процесса работы установки вихревой сатурации позволили сделать следующие выводы:

1. Водовоздушная смесь, содержащая пузырьки воздуха меньшего размера ( $d_{\text{п}} = 70\text{--}103$  мкм), образуется при использовании технологического приема подса-

сывания атмосферного воздуха во входную линию центробежного насоса, подающего рециркулирующий поток жидкости в вихревое сатурационное устройство, при этом величина коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси имеет значение  $\varphi = 0,0019-0,0116$ .

2. В процессе реализации технологического приема подсасывания атмосферного воздуха во входную линию центробежного насоса при величине избыточного давления водовоздушной смеси на входе в вихревое сатурационное устройство  $\Delta P = 0,1 - 0,4$  МПа величина удельной массовой диссипации энергии в вихревом сатурационном устройстве имеет значение  $\varepsilon_m = 111 - 445$  Дж/кг, при этом величина коэффициента эффективности работы сатуратора изменяется в пределах  $\Xi_c = 9,5 - 14,5$  %.

3. Технологическая схема, предусматривающая одновременную подачу сжатого воздуха от компрессора в эжектор, пропускающий рециркуляционный поток жидкости, и подсасывание воздуха во входной патрубок центробежного насоса, существенно усложняет процесс эксплуатации вихревого сатурационного устройства и не обеспечивает повышения степени дисперсности образующейся водовоздушной смеси.

4. Проток жидкости через бак-классификатор фракции пузырьков воздуха водовоздушной смеси несущественным образом снижает технологические показатели образующейся водовоздушной смеси. Диаметр образующихся пузырьков воздуха увеличивается до  $d_n = 78-108$  мкм, коэффициент газонаполнения снижается до значения  $\varphi = 0,0016-0,019$ .

#### Список литературы

1. Вихревой сатуратор / С.Ю. Андреев, Т.А. Глебова, К.В. Лебединский, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 134–141.
2. Теоретическое обоснование интенсификации процесса напорной флотационной очистки сточных вод за счет повышения эффективности растворения воздуха в сатураторе / С.Ю. Андреев, А.И. Шеин, С.В. Степанов, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1(46). – С. 160–169.
3. Алексеев, Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией / Е.В. Алексеев. – Москва : Изд-во АСВ, 2009. – С. 136.
4. Патент на полезную модель № 231958 U1 Российская Федерация, МПК B01F 23/23, B01F 23/2373, C02F 1/24. Вихревой сатуратор : заявл. 11.07.2024 : опубл. 19.02.2025 / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, М.А. Сафронов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

#### References

1. Vortex saturator / S.Y. Andreev, T.A. Glebova, K.V. Lebedinsky, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 3(60). – P. 134–141.
2. Theoretical justification of the intensification of the process of pressure flotation wastewater treatment by increasing the efficiency of air dissolution in the saturator / S.Y. Andreev, A.I. Shein, S.V. Stepanov, V.A. Knyazev // Regional architecture and construction. – 2021. – № 1(46). – P. 160–169.
3. Alekseev, E.V. Fundamentals of wastewater treatment technology by flotation / E.V. Alekseev. – Moscow : Publishing House ASU, 2009. – P. 136.
4. Utility Model Patent No. 231958 U1 Russian Federation, IPC B01F 23/23, B01F 23/2373, C02F 1/24. Vortex saturator : application 07/11/2024 : published 02/19/2025 / S.Y. Andreev, K.V. Lebedinsky, M.A. Safronov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Penza State University of Architecture and Construction.

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

**Столяров Даниил Владимирович**,  
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: sdv@bk.ru

**Королева Тамара Ивановна**,  
кандидат экономических наук, профессор  
кафедры «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: korolevatamara@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

**Stolyarov Daniil Vladimirovich**,  
Postgraduate student of the Department «Heat  
and Gas Supply and Ventilation»  
E-mail: sdv@bk.ru

**Koroleva Tamara Ivanovna**,  
Candidate of Economic Sciences, Professor of  
the Department «Heat and Gas Supply and  
Ventilation»  
E-mail: korolevatamara@mail.ru

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В КИНЕТИЧЕСКОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Д.В. Столяров, Т.И. Королева

Представлены результаты исследования процесса двухступенчатого сжигания метановодородных топливных смесей с воздухом в кинетическом газовом горелочном устройстве средней тепловой мощности. Приведена математическая постановка задачи, учитывающая физические и математические особенности описания процесса двухступенчатого гомогенного кинетического горения топливовоздушных смесей. На основе результатов численного моделирования показано, что при двухступенчатом сжигании по сравнению со схемами одноступенчатого сжигания газовых топливных смесей достигается более чем в 2.8 раза при низких массовых долях водорода и более чем в 1.5 раза при высоких массовых долях водорода эффективное подавление выбросов оксидов азота.

*Ключевые слова: кинетические газовые горелки, топливные смеси, CFD-моделирование, двухступенчатое сжигание, устойчивость горения, образование вредных веществ*

## NUMERICAL SIMULATION OF TWO-STAGE COMBUSTION OF METHANE-HYDROGEN FUEL MIXTURES IN A KINETIC BURNER DEVICE

D.V. Stolyarov, T.I. Koroleva

The article investigates the process of two-stage combustion of methane-hydrogen fuel mixtures with air in a kinetic gas burner device of medium thermal power. The mathematical formulation of the problem is given, taking into account physical and mathematical features of the description of the process of two-stage homogeneous kinetic gorenje of fuel-air mixtures. Based on the results of numerical modeling, it is shown that with two-stage combustion, effective suppression of nitrogen oxide emissions is achieved by more than 2.8 times with low mass fractions of hydrogen, and by more than 1.5 times with high mass fractions of hydrogen, compared with single-stage combustion schemes of gas fuel mixtures.

*Keywords: kinetic gas burners, fuel mixtures, CFD modeling, two-stage combustion, gorenje stability, formation of harmful substances.*

**Введение.** Двухступенчатое сжигание топлив является технологией организации процесса сгорания энергетических топлив, при которой процесс горения разделяется

на две фазы: на первой ступени сгорания происходит частичное окисление топлива при недостатке окислителя ( $\alpha < 1$ ), чем достигается снижение максимальных значений температур факела пламени и, следовательно, скорости образования  $\text{NO}_x$ ; на второй ступени сгорания осуществляется дожигание промежуточных продуктов реакций окисления топлива с введением в зону горения окислителя в стехиометрической концентрации либо в концентрации, превышающей стехиометрическую ( $\alpha \geq 1$ ).

Применение технологии двухступенчатого сжигания газообразных топлив по оценкам, приведенным в работе [1], позволит сократить объем выбросов  $\text{NO}_x$  на 25–30 % без существенных затрат на модернизацию и техническое перевооружение теплогенерирующих установок.

Технология двухступенчатого сжигания является особенно актуальной для метановодородных топливных смесей (МВТС), потому что, с одной стороны, отношение скоростей горения водорода и метана составляет величину  $\sim 10$ , чем обусловлена сравнительно высокая вероятность возникновения неустойчивости горения и формирования зон в факеле пламени, имеющих статическую температуру  $\geq 2000$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), что, в свою очередь, приводит к возрастанию эмиссии термических  $\text{NO}_x$  и их выбросам в атмосферу. С другой стороны, область воспламенения водорода шире, чем область воспламенения метана, и, кроме того, для газоснабжения теплогенерирующих установок наиболее часто используются МВТС переменного состава, т.е. МВТС, характеризующиеся существенной неустойчивостью компонентного состава получаемой смеси [2]. Поэтому возникает необходимость регулирования расхода вводимого воздуха на каждой ступени сгорания МВТС для стабилизации фронта горения в зависимости от отношения массовых (объемных) долей метана и водорода в топливной смеси.

Таким образом, вышеприведенные особенности процесса сгорания МВТС с высоким содержанием водорода (при  $\omega(\text{H}_2) > 30\%$ ) определяют суть проблемы по созданию низкоэмиссионных горелочных устройств с высокой стабильностью фронта турбулентного пламени. Данной проблеме посвящена настоящая работа.

Исследованию процесса двухступенчатого сжигания МВТС в газовых горелочных устройствах теплогенерирующих установок, а также в газотурбинных установках (ГТУ) посвящено большое число работ, многие из которых опубликованы в зарубежных научных изданиях. Среди них необходимо отметить работы [3–7]. Так, в [3] рассматриваются результаты исследования двухступенчатого сжигания МВТС в ГТУ. На основе выполненного исследования показано, что добавление водорода к метану изменяет режим горения на второй ступени. При высоких концентрациях водорода ( $\omega(\text{H}_2) \geq 25\%$  (об.)) наблюдается образование множественных очагов самовоспламенения перед основным фронтом горения, что усиливает стабилизацию пламени. Результаты исследования подчеркивают важность учета течения промежуточных продуктов горения и неравновесных радикалов (например  $\text{OH}$ ) из первой ступени для воспламенения во второй.

Особенно необходимо отметить работы [4, 7]. Так, в [4] приведены результаты исследования вихревой газовой горелки с двухступенчатой подачей воздуха, используемой в промышленных паровых и водогрейных котлах. Показано, что вторичный воздух изменяет структуру течения реагирующей газозооной смеси, уменьшая зону рециркуляции и снижая температуру в первичной зоне горения, что критично для снижения выбросов  $\text{NO}_x$ . Для смесей с высоким содержанием водорода ( $\omega(\text{H}_2) \leq 95\%$  (об.)) оптимальные результаты по подавлению эмиссии  $\text{NO}_x$  достигнуты при коэффициенте избытка воздуха во второй ступени  $\alpha = 1.3$  и  $\alpha = 0.5$  первичного воздуха. В [7] приведен анализ метода двухступенчатого сжигания газового топлива в паровом котле ТГМЕ-464. В работе показаны оптимальные результаты по снижению эмиссии  $\text{NO}_x$  при увеличении скорости подачи воздуха и природного газа на 10 % соответственно. Отношение массовой доли  $\text{NO}_x$  в пламени при одноступенчатом сжигании к массовой доли  $\text{NO}_x$  в пламени при двухступенчатом сжигании составляет

величину ~23 %, что подтверждает целесообразность применения двухступенчатого сжигания топлива для подавления эмиссии  $\text{NO}_x$ .

К числу основных недостатков работ [3–7] необходимо отнести следующее:

- в работах [4, 5] при выполнении численного моделирования трехмерного нестационарного турбулентного кинетического горения MBTC с воздухом для описания протекающих химических реакций использовался редуцированный кинетический механизм, содержащий 16 компонентов и 41 элементарную химическую реакцию. При применении такого механизма без валидации математической модели на основе результатов экспериментальных исследований (например измерений на основе газохроматографических методов, PLIF-методов или методов зондовой диагностики) наблюдается занижение концентраций промежуточных продуктов реакций (например радикалов  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CHO}$  и др.), что неизбежно приводит к убыванию индекса эмиссии  $\text{NO}_x$ ;

- в работах [3–7] рассмотрены результаты исследования процессов сгорания природного газа и MBTC преимущественно в горелочных устройствах промышленных и энергетических теплогенерирующих установок высокой и сверхвысокой мощности, а также ГТУ. Кроме того, численное моделирование горения газовых топлив выполнялось при ограниченном диапазоне значений параметров горелочных устройств: например, в работе [6] описаны исследования топливовоздушных смесей с эквивалентными отношениями  $\Phi \in [0.4; 1.4]$  при скорости подачи топлива, равной постоянной

величине ( $v_{fuel}^0 = 5 \text{ (м/с)}$ ); в работе [7] скорости подачи топлива составляли величины, равные:  $\left[0,1 \cdot \left(Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}\right)\right] + Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}$ ,  $\left[0,2 \cdot \left(Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}\right)\right] + Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}$  и  $\left[0,3 \cdot \left(Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}\right)\right] + Q_{fuel} / \sum A_{g.b.}$ , при этом данные о влиянии изменения начальных скоростей подачи топлива и окислителя в зону сгорания на устойчивость горения и стабилизацию пламени в указанной работе не приводятся.

Таким образом, настоящая работа является продолжением теоретических исследований процесса двухступенчатого сжигания MBTC в кинетических газовых горелочных устройствах средней тепловой мощности, оценки устойчивости горения и факторов, влияющих на стабилизацию фронта пламени.

**Материалы и методы исследования.** Для описания процесса и характеристик двухступенчатого сжигания MBTC с воздухом в кинетическом горелочном устройстве сформулирована задача о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газовой смеси, замкнутая моделью химической кинетики и дифференциальной моделью турбулентности.

Проводились исследования модифицированной кинетической газовой горелки ГГВ-10С с принудительной подачей воздуха в зону сгорания, номинальной тепловой мощностью 116 кВт, являющейся горелочным устройством средней мощности. Модификация исследуемой газовой горелки заключается в организации схемы двухступенчатого сжигания топливной смеси, что достигается посредством ввода концентрического патрубка подачи вторичного воздуха по периферии среза сопла первой ступени сгорания так, как это показано на рис. 1.

Геометрические размеры горелочного устройства, указанные на рис. 1, выбраны согласно проектным характеристикам газовой горелки ГГВ-10С [8]. В соответствии с результатами предварительного оценочного численного моделирования течения топливной смеси без учета химических реакций в горелочном устройстве рассматриваемой конфигурации отношения диаметра и длины концентрического патрубка подачи вторичного воздуха в зону сгорания к диаметру и длине сопла первой ступени сгорания выбраны следующими:  $D_2 / D = 1.5$ ;  $L_2 / L = 0.4$ .

Геометрические размеры расчетных областей задач определяются исходя из значений внешнего диаметра  $D$  сопла горелочного устройства: пусть  $D$  – калибр, тогда координаты расчетной области в декартовой прямоугольной системе координат в пространстве будут следующими:  $\{(x, y, z): 0 \leq x \leq L + 20D; 0 \leq y \leq 4D; 0 \leq z \leq 4D\}$ .



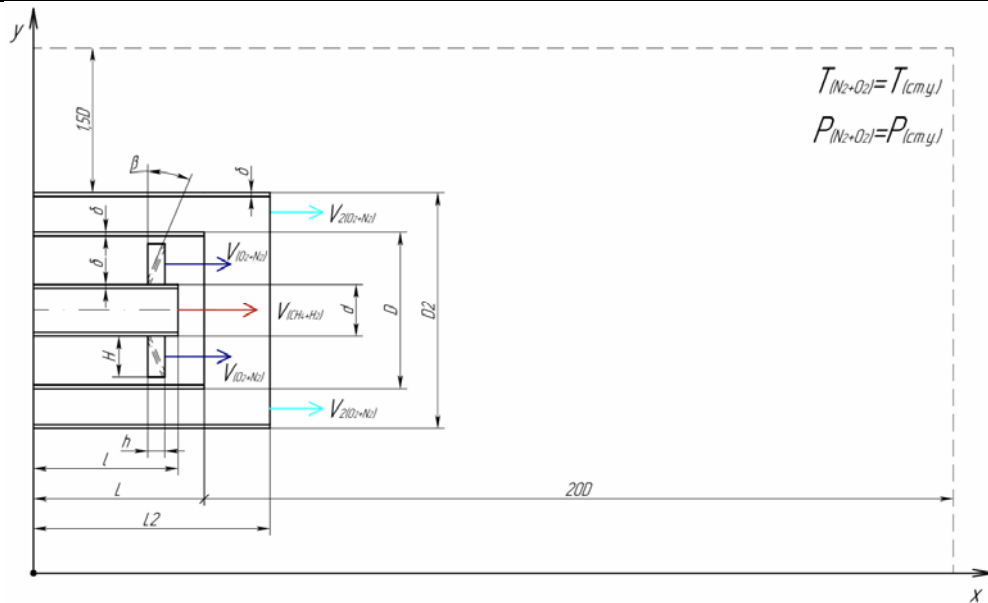


Рис. 1. Схема расчетной области задачи о двухступенчатом сжигании MBTC с воздухом в кинетической газовой горелке

Запишем теперь для декартовой системы координат систему уравнений Навье – Стокса, осредненных по Фавру (FANS), учитывая физические и математические особенности описания процесса двухступенчатого горения топливной смеси (например, сжимаемость потока реагирующей газовой среды, связанные с этим свойством особенности моделирования турбулентных потоков массы и тепла, нелинейность химических источниковных членов ( $\dot{W}_k = f(T, c_k)$ ) и т.д.). Система уравнений FANS включает следующие уравнения:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

– уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \bar{\rho} g_i = 0; \quad (2)$$

– уравнение энергии, которое для рассматриваемого течения удобно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{I})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{I})}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial \tilde{I}}{\partial x_j} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \sum_{k=1}^N D_k i_k \frac{\partial \tilde{c}_k}{\partial x_j} \right) + \bar{Q}_x - \bar{Q}_p = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

– уравнение сохранения массы k-го химического компонента

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{c}_k)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{c}_k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} (D_k + D_{k(t)}) \frac{\partial \tilde{c}_k}{\partial x_j} \right) = \bar{W}_k; \quad (4)$$

– уравнение состояния для смеси идеальных газов

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \tilde{T} \sum_{k=1}^N \frac{\tilde{c}_k}{M_k}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $u_i$  – компонента скорости течения газовой смеси в  $i$ -м направлении,  $\text{м/с}$ ;  $u_j$  – компонента скорости течения газовой смеси в  $j$ -м направлении,  $\text{м/с}$ ;  $p$  – давление газовой смеси,  $\text{Па}$ ;  $\tau_{ij}$  – тензор напряжений,  $\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} + \bar{\tau}_{ij,t}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ ;  $I$  – полная энтальпия газовой смеси,  $\text{Дж}$ ;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности газовой смеси,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\alpha = \alpha_m + \alpha_t$ ;  $T$  – температура газовой смеси,  $\text{К}$ ;  $i_k$  – удельная энтальпия  $k$ -го компонента газовой смеси,  $\text{Дж/кг}$ ;  $D_k$  – коэффициент молекулярной диффузии  $k$ -го компонента газовой смеси,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D_{k(t)}$  – коэффициент турбулентной диффузии  $k$ -го компонента газовой смеси,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c_k$  – массовая доля  $k$ -го химического компонента;  $Q_x$  – объемная плотность тепловыделения в газовой смеси за счет протекающих химических реакций,  $\text{Вт/м}^3$ ;  $\dot{Q}_p$  – дивергенция радиационного теплового потока,  $\text{Вт/м}^3$ ;  $M_k$  – молярная масса  $k$ -го химического компонента,  $\text{кг/моль}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8.314 \text{ Дж/(моль}\times\text{К)}$ .

Для описания турбулентного течения газовой смеси в работе используется модель переноса напряжений Рейнольдса RSM (Reynolds stress equation model), позволяющая точно воспроизводить анизотропную структуру турбулентности, а также сложные эффекты взаимодействия турбулентности и горения (TCI), которые необходимо учитывать ввиду различия диффузионных свойств компонентов топливной смеси ( $\text{Le}_{\text{H}_2} \approx 0.3$ ;  $\text{Le}_{\text{CH}_4} \approx 0.9$ ) и сильной зависимости скорости горения от кривизны и пространственного растяжения фронта пламени. Из-за объемности и чрезвычайной сложности математического описания модели турбулентности RSM она не приводится в настоящей работе. Стандартная модель давления-деформации и уравнения переноса для рейнольдсовых напряжений приведены в [9]. Однако для корректного описания турбулентного горения стандартная модель RSM должна быть модифицирована: необходимо включить в соответствующие уравнения члены, учитывающие генерацию турбулентности из-за протекающих химических реакций, а также члены, связанные с пульсациями плотности и дивергенцией скорости потока реагирующей газовой смеси; следует ввести уравнения переноса для турбулентных потоков массы и тепла; выполнить адаптацию собственных констант модели ( $C_1, C_2, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ ) для рассматриваемого течения. Основные аспекты модификации стандартной модели RSM для описания турбулентного горения подробно изложены в [10].

Моделирование радиационного теплообмена в настоящей работе осуществляется посредством решения уравнения переноса излучения (RTE), описывающего изменение интенсивности излучения  $I_v(\vec{r}, \vec{s})$  в заданной точке  $\vec{r}$  и направлении  $\vec{s}$  с учетом излучения, поглощения и рассеяния методом дискретных ординат (DO). При этом для расчета коэффициента поглощения газообразной среды ( $\kappa_v = \kappa$ ), входящего в RTE, используется метод взвешенной суммы серых газов (WSSG) [11].

Для моделирования турбулентного горения в настоящей работе, как и в работах [4, 5], применяется метод FGM, основанный на предположении, что сложное многомерное пространство химических состояний можно свести к низкоразмерному многообразию, параметризованному сравнительно небольшим числом переменных. Авторами используется детальный кинетический механизм окисления MBTC Wang-2018 [12], содержащий 48 компонентов и 352 элементарные химические реакции.

Концентрации выбросов  $\text{NO}_x$  в настоящем исследовании определяются на основе решения уравнений скорости их образования, протекающего по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича (термические  $\text{NO}_x$ ) и по механизму С.В. Фенимора (сверхравновесные  $\text{NO}_x$ ).

Граничные условия для расчетной области рассматриваемой задачи приведены в таблице.

Граничные условия для расчетной области задачи

Граница	Выражение
Все боковые границы, за искл. правой	$P_{out} = P_{gas(0)} ; T_{out} = T_{gas(0)} ; \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Правая граница	$P_{out} = P_{gas(0)} ; \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = 0$
Обл. ввода МВТС	$T_{in(gas)} = T_{gas(0)} ; G_{in(gas)}^m = G_0^m ; \omega(CH_4) = \omega_0^{(CH_4)} ; \omega(H_2) = \omega_0^{(H_2)}$
Обл. ввода первичного возд.	$T_{in(air)} = T_{gas(0)}$ $G_{in(air)}^{m1} = \alpha_1 \frac{G_{in(gas)}^m}{\omega(O_2)} \left( \omega(CH_4) \frac{G_{m(O_2)}^{(CH_4)}}{M(CH_4)} + \omega(H_2) \frac{G_{m(O_2)}^{(H_2)}}{M(H_2)} \right)$
Обл. ввода вторичного возд.	$T_{in(air)} = T_{gas(0)}$ $G_{in(air)}^{m2} = \alpha_2 \frac{G_{in(gas)}^m}{\omega(O_2)} \left( \omega(CH_4) \frac{G_{m(O_2)}^{(CH_4)}}{M(CH_4)} + \omega(H_2) \frac{G_{m(O_2)}^{(H_2)}}{M(H_2)} \right)$

Численное решение задачи о двухступенчатом сжигании МВТС с воздухом в кинетическом горелочном устройстве производилось по методу МКЭ в процессоре CFD Ansys Fluent 2025R1.

**Результаты и их обсуждение.** Рассмотрим результаты решения задачи о нестационарном течении многокомпонентной неравновесно реагирующей газовой смеси, замкнутой моделью химической кинетики и дифференциальной моделью турбулентности в квазистационарном приближении. На рис. 2 представлены графики распределения поля статических температур пламени при двухступенчатом кинетическом горении МВТС с воздухом различного компонентного состава.

Как следует из рис. 2, при повышении массовой доли  $H_2$  в топливной смеси, помимо возрастания максимальных и средних значений статических температур ( $T_{max1} \approx 1800^\circ C$ ;  $T_{max2} \approx 2000^\circ C$ ,  $T_1 \approx 1200^\circ C$ ;  $T_2 \approx 1500^\circ C$ ), наблюдается еще и увеличение относительной длины факела пламени ( $L_{\phi1} / D_{\phi1} \approx 6.7$ ;  $L_{\phi2} / D_{\phi2} \approx 7.5$ ), что усложняет стабилизацию фронта горения. Действительно, при  $\omega(H_2) / \omega(CH_4) = 0.9 / 0.1$  факел имеет длинный асимметричный внешний контур (см. рис 2 (2)). Такое пламя обладает сравнительно большей кинетической энергией и стремится к отрыву от зоны стабилизации. Оно более чувствительно к колебаниям расхода газов, состава горючей смеси и другим гидродинамическим возмущениям, что увеличивает вероятность отрыва или проскока внутрь сопла газовой горелки. На рис. 2 (1) факел имеет осесимметричный широкий внешний контур, что свидетельствует о достижении стационарного режима горения с развитой зоной рециркуляции продуктов сгорания, которые имеют высокую температуру и непрерывно воспламеняют свежую горючую смесь в первой ступени.

Рассмотрим теперь графики распределения поля массовых долей  $NO_x$  в пламени при двухступенчатом кинетическом горении МВТС с воздухом различного компонентного состава (рис. 3).

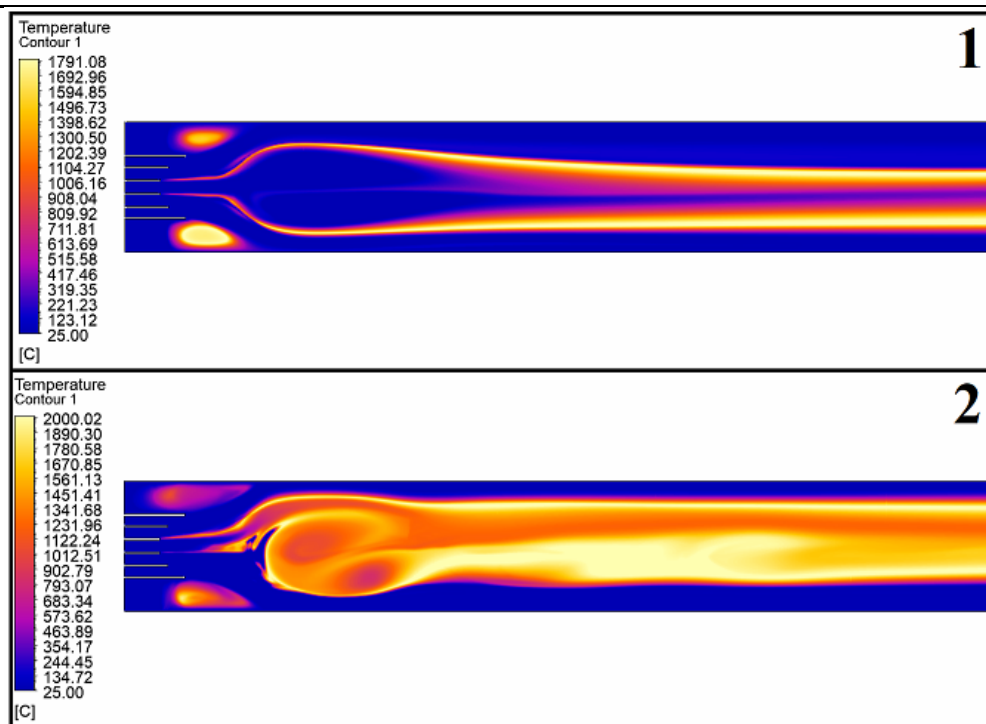


Рис. 2. Графики расчетных зависимостей распределения поля статических температур пламени при двухступенчатом кинетическом горении МВТС с воздухом:

- 1 – расчетная зависимость при компонентном составе МВТС  $\omega(\text{H}_2)/\omega(\text{CH}_4) = 0.1/0.9$ ;
- 2 – расчетная зависимость при компонентном составе МВТС  $\omega(\text{H}_2)/\omega(\text{CH}_4) = 0.9/0.1$

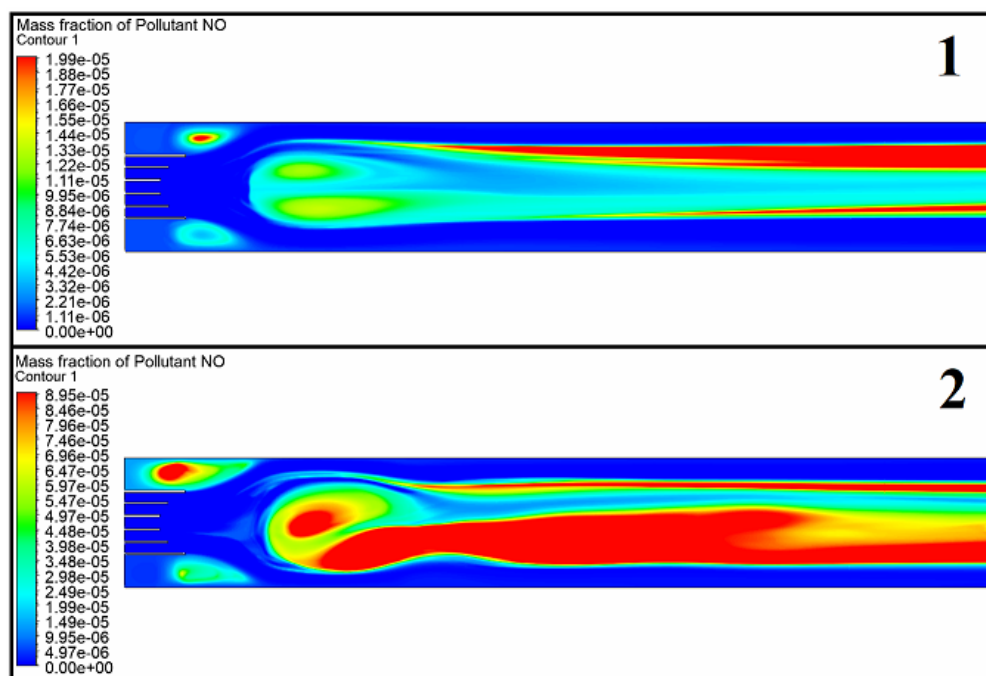


Рис. 3. Графики расчетных зависимостей распределения поля массовых долей  $\text{NO}_x$  в пламени при двухступенчатом кинетическом горении МВТС с воздухом:

- 1 – расчетная зависимость при компонентном составе МВТС  $\omega(\text{H}_2)/\omega(\text{CH}_4) = 0.1/0.9$ ;
- 2 – расчетная зависимость при компонентном составе МВТС  $\omega(\text{H}_2)/\omega(\text{CH}_4) = 0.9/0.1$

Как следует из рис. 3, с увеличением массовой доли  $H_2$  в топливной смеси возрастают максимальные значения массовых долей  $NO_x$ : при  $\omega(H_2) = 0.1$  максимальное значение массовой доли  $NO_x$  в пламени составляет величину  $\omega_{\max}(NO_x) = 2 \times 10^{-5}$ , а при  $\omega(H_2) = 0.9$  – величину  $\omega_{\max}(NO_x) = 9 \times 10^{-5}$ . Однако полученные значения массовых долей  $NO_x$  в пламени при двухступенчатом сжигании MBTC с воздухом оказываются значительно меньшими для аналогичного компонентного состава топливной смеси по сравнению с одноступенчатым сжиганием MBTC с воздухом в рассматриваемой в настоящей работе кинетической газовой горелке: так, отношение максимальных значений массовых долей  $NO_x$  при  $\omega(H_2) = 0.1$  составляет величину  $\omega_{\max}^{(1st.)}(NO_x) / \omega_{\max}^{(2st.)}(NO_x) = 2.85$ , а при  $\omega(H_2) = 0.9$  – величину  $\omega_{\max}^{(1st.)}(NO_x) / \omega_{\max}^{(2st.)}(NO_x) = 1.51$ . Представленные результаты и количественные оценки хорошо согласуются с данными работ [4, 7]. Необходимо также отметить, что основной причиной более эффективного подавления эмиссии  $NO_x$  при двухступенчатом сжигании MBTC со сравнительно низкой массовой долей  $H_2$  является увеличение вклада реакций образования термических  $NO_x$  при возрастании статической температуры факела: действительно, при наложении графиков, представленных на рис. 2 и 3, очевидно, что зоны с максимальной концентрацией  $NO_x$  строго соответствуют зонам с максимальными значениями температуры факела пламени. Между тем выбранные в настоящем исследовании значения коэффициентов избытка окислителя на каждой ступени сгорания  $\alpha_1 = 0.8$ ;  $\alpha_2 = 1.2$  обеспечивают убывание максимальных значений статических температур факела пламени на 400–440 °С, в сравнении со схемой одноступенчатого сжигания MBTC для рассматриваемого горелочного устройства. Этим обеспечивается эффективное снижение более чем в 1.5 раза выбросов  $NO_x$  при высоких массовых долях  $H_2$  при двухступенчатом сжигании MBTC с воздухом.

Указанный результат также согласуется с данными работы [4].

**Заключение.** При выполнении теоретического исследования двухступенчатого сжигания MBTC с воздухом в кинетическом горелочном устройстве получены следующие основные результаты:

- рассмотрена математическая постановка задачи, учитывающая физические и математические особенности описания процесса двухступенчатого гомогенного кинетического горения топливовоздушных смесей;
- на основе результатов численного моделирования двухступенчатого сжигания MBTC с воздухом в кинетической газовой горелке ГТВ-10С показано, что с возрастанием массовой доли водорода в топливной смеси значительно усложняется стабилизация фронта горения, т.к. в этом случае пламя обладает сравнительно большей кинетической энергией и стремится к отрыву от зоны среза сопла первичной ступени сгорания. В этой связи требуется разработка дополнительных технических решений, направленных на повышение устойчивости горения топливных смесей с высокой концентрацией водорода;
- получены отношения максимальных значений массовых долей  $NO_x$  для аналогичного компонентного состава топливной смеси при одноступенчатом и двухступенчатом сжигании в кинетической газовой горелке ГТВ-10С, подтверждающие более чем в 2.8 раза при низких массовых долях водорода и более чем в 1.5 раза при высоких массовых долях водорода эффективное подавление выбросов  $NO_x$  для схемы двухступенчатого сжигания MBTC с воздухом.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы при разработке технических решений и мероприятий, направленных на дальнейшее совершенствование методов снижения выбросов вредных веществ, образующихся при сгорании MBTC.

1. Катин, В.Д. Малоотходная технология двухступенчатого сжигания топлива в нефтезаводских печах / В.Д. Катин, А.Ю. Березуцкий // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – №6 (51). – С. 45–48.
2. Лебедева, Е.А. Проблемы сжигания топливных смесей переменного состава / Е.А. Лебедева // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 3–1. – С. 48–53.
3. Impagnatiello, M. Numerical Study of Ignition and Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Sequential Combustor / M. Impagnatiello, Q. Malé, N. Noiray // Flow Turbulence Combust. – 2024. – 112. – 1249–1273.
4. Pinto, B.M. Numerical Simulation of Natural Gas / B.M. Pinto, G.P. Pacheco, M.A.A. Mendes, P.J. Coelho // Hydrogen Combustion in a Novel Laboratory Combustor. – Appl. Sci. 2025. – 15. – 7123.
5. Nieto-Londoño, C. Numerical Assessment of the Combustion of Methane–Hydrogen–Air Mixtures in Micro-Scale Conditions / C. Nieto-Londoño, W. Silva-López, N. Gómez-Velásquez // Processes. – 2025. – 13. – 794.
6. Столяров, Д.В. Теоретическое исследование процессов образования вредных веществ при сжигании метановодородных топливных смесей в теплогенерирующих установках / Д.В. Столяров, Т.И. Королева, О.П. Сидельникова // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сборник статей XXV Международной научно-практической конференции, Пенза, 12–13 ноября 2024 года. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2024. – С. 152–158.
7. Ковальногов, В.Н. Исследование процесса двухступенчатого сжигания топлива в котле ТГМЕ-464 / В.Н. Ковальногов, Д.А. Генералов, А.Р. Валеева // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ульяновск, 09–11 октября 2023 года. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2023. – С. 87–89.
8. Горелка вихревая газовая низкого и среднего давления ГГВ. – URL: [https://all-gas.ru/product\\_list/](https://all-gas.ru/product_list/).
9. Launder, B.E. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure / B.E. Launder, G.J. Reece, W. Rodi // Journal of Fluid Mechanics. – 1975. – 68(3). – 537–566.
10. Celtek, M.S. The impact of turbulence and combustion models on flames and emissions in a low swirl burner / M.S. Celtek, A. Pınarbaşı, G. Coskun, U. Demir // Fuel. – 2023. – 343. – 127905. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127905>.
11. Yin, C. A new air-fuel WSGGM for better utility boiler simulation, design and optimization / C. Yin // International Conference on Power Engineering. – 2013. – ICOPE 2013.
12. Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry / T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou // Int. J. Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43, Is. 6. – P. 3330–3341.

## References

1. Katin, V.D. Low-waste technology of two-stage fuel combustion in oil refinery furnaces / V.D. Katin, A.Yu. Berezutsky // Bulletin of VSGUT. – 2014. – No. 6 (51). – P. 45–48.
2. Lebedeva, E.A. Problems of combustion of fuel mixtures of variable composition / E.A. Lebedeva // Modern high-tech technologies. – 2019. – No. 3–1. – P. 48–53.
3. Impagnatiello, M. Numerical Study of Ignition and Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Sequential Combustor / M. Impagnatiello, Q. Malé, N. Noiray // Flow Turbulence Combust. – 2024. – 112. – 1249–1273.
4. Pinto, B.M. Numerical Simulation of Natural Gas / B.M. Pinto, G.P. Pacheco, M.A.A. Mendes, P.J. Coelho // Hydrogen Combustion in a Novel Laboratory Combustor. – Appl. Sci. 2025. – 15. – 7123.

5. Nieto-Londoño, C. Numerical Assessment of the Combustion of Methane–Hydrogen–Air Mixtures in Micro-Scale Conditions / C. Nieto-Londoño, W. Silva-López, N. Gómez-Velásquez // *Processes*. – 2025. – 13. – 794.
6. Stolyarov, D.V. Theoretical study of the formation of harmful substances during the combustion of methane-hydrogen fuel mixtures in heat generating plants / D.V. Stolyarov, T.I. Koroleva, O.P. Sidelnikova // *Problems of energy conservation and ecology in industrial and housing and communal complexes : collection of articles XXV International Scientific and Practical Conference, Penza, 12-13 November 2024*. – Penza : Privolzhsky House of Knowledge, 2024. – P. 152–158.
7. Kovalnogov, V. N. Investigation of the process of two-stage fuel combustion in the TGME-464 boiler / V. N. Kovalnogov, D. A. Generalov, A. R. Valeeva // *Development of methods of applied mathematics for solving interdisciplinary problems of energy : Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation, Ulyanovsk, October 09-11, 2023*. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2023. – P. 87–89.
9. Launder, B.E. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure / B.E. Launder, G.J. Reece, W. Rodi // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1975. – 68(3). – 537–566.
10. Celtek, M.S. The impact of turbulence and combustion models on flames and emissions in a low swirl burner / M.S. Celtek, A. Pınarbaşı, G. Coskun, U. Demir // *Fuel*. – 2023. – 343. – 127905. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127905>.
11. Yin, C. A new air-fuel WSGGM for better utility boiler simulation, design and optimization / C. Yin // *International Conference on Power Engineering*. – 2013. – ICOPE 2013.
12. Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry / T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43, Is. 6. – P. 3330–3341.

Национальный исследовательский  
университет Московский государственный  
строительный университет

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское  
шоссе, д.26

**Боронина Людмила Владимировна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»

E-mail: boroninalv@gmail.com

National Research University Moscow State  
University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoye  
highway

**Boronina Liudmila Vladimirovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Heat and gas supply and  
ventilation»

E-mail: boroninalv@gmail.com

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ КОММУНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ НАУКИ О ТРУБОПРОВОДАХ

Л.В. Боронина

Практика использования водопроводных, канализационных и отопительных магистралей городских коммуникаций показывает, что на внутренней поверхности труб в ходе работы образуется осадочный слой, влияющий на их гидродинамические свойства и в конце концов увеличивающий потребление энергии насосными установками, обеспечивающими транспортировку воды до потребителей. Помимо этого остаётся нерешённым значимый вопрос относительно длительности срока службы таких инженерных конструкций.

Показано на примере, что при гидравлическом расчете металлических водопроводных труб и труб тепловых сетей с внутренними отложениями изменяется значение коэффициента эффективности их эксплуатации. Приведена разработанная методика прогнозирования продолжительности периода остаточной эксплуатации изношенных водопроводных, канализационных и тепловых сетей с разной толщиной слоя внутренних отложений, учитывающая фактическую толщину этого слоя.

*Ключевые слова: износ трубопроводов, водопроводные, канализационные, тепловые сети, осадочный слой, гидродинамические свойства*

## QUANTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF COMMUNAL INFRASTRUCTURE ENGINEERING NETWORKS OPERATION A NEW DIRECTION IN PIPELINE SCIENCE

L.V. Boronina

The practice of using waterpipe, sewage and heating highways shows that in time sedimentary layer forms on the internal surface of the pipes and it influences their hydrodynamic properties and increasing energy consumption by pumping units which transport water to consumers. Besides the question of service life length of there engineering structures is not solved.

It is shown by the example that during hydraulic calculation of metal water pipes and pipes of thermal networks with internal deposits, the value of the efficiency coefficient of their operation changes. A methodology has been developed for predicting the period of residual duration of operation of worn-out water, sewer and heating networks with different thickness of the inner layer.

*Keywords: pipeline wear, water supply, sewerage, heating networks, sedimentary layer, hydrodynamic properties*



Технологический комплекс водопроводных и канализационных сооружений – это сложный инженерный объект, эксплуатация которого ведется по трем направлениям:

- эксплуатация трубопроводов подачи и распределения питьевой воды потребителям;
- эксплуатация сооружений на водопроводных сетях: насосные станции, накопительные или регулирующие емкости, насосы и арматура на сетях и др.;
- эксплуатация очистных сооружений канализации, включая трубопроводы для выпуска очищенных сточных вод в водоемы.

По данным Минстроя России на 25.03.2021 года, в стране эксплуатируется 584 268,3 км водопроводных сетей, из которых около половины выполнены из стальных и чугунных труб из серого чугуна. Протяженность канализационных сетей в РФ на 31.12.2019 – 200 181,6 км.

Опыт эксплуатации коммунальных сетей водоснабжения, канализации и металлических тепловых сетей городской инфраструктуры показывает, что их рабочая поверхность в процессе эксплуатации подвержена образованию на внутренних стенках труб слоя отложений (осадка), изменяющего их гидравлические характеристики и в конечном счете энергопотребление насосных агрегатов, транспортирующих водную среду потребителям.

Кроме того, остается нерешенным важный вопрос о том, какова продолжительность периода остаточной эксплуатации таких трубопроводов инженерной инфраструктуры. Подтверждением наличия такой проблемы является техническое состояние коммунальных сетей в Астраханском регионе.

Проблема технического состояния систем водоснабжения и водоотведения в Астраханском регионе стоит достаточно остро, особенно в течение последних десяти лет. Причиной являются ветхость сетей, опережающее строительство зданий без учета наличия и мощности коммунальных систем, особенность Астраханского региона – грунтовые воды и др.

На рис. 1 показаны металлические трубы, имеющие внутренние отложения, инженерной инфраструктуры в Астраханском регионе.

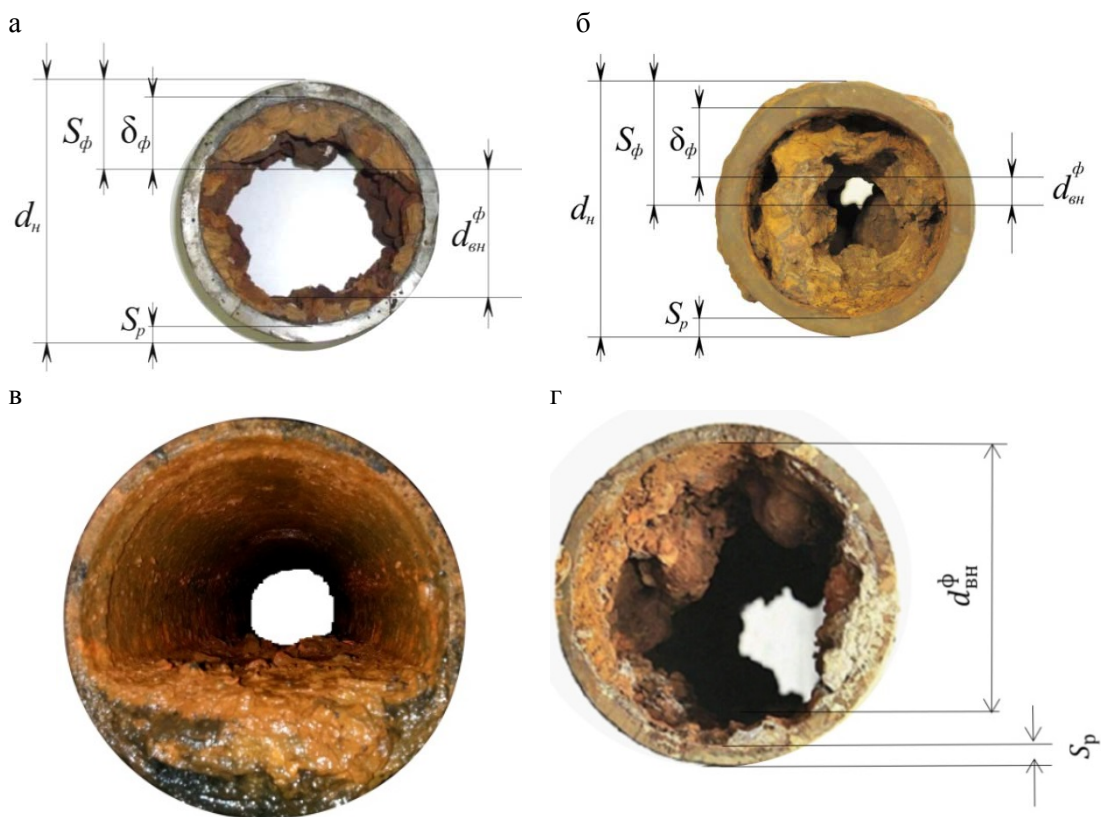


Рис. 1. Внутренние отложения на стенках:

а – металлических водопроводных труб; б – напорных канализационных коллекторов;  
в – самотечных сетей канализации; г – металлических сетей теплоснабжения

Техническое обследование участков водопроводных (диаметром 100-500 мм) и канализационных (диаметром 600-1200 мм) сетей в центральной части города Астрахани в 2021 году проводилось с целью выявления: степени износа, обнаружения дефектов и повреждений строительных конструкций, элементов системы и оборудования.

В результате проведенного технического обследования металлических сетей водоснабжения и канализации г. Астрахани установлено следующее: оценка степени износа трубопроводов систем водоснабжения и канализации соответствует категории Д, степень износа – 90 % [5].

Дополнительный неразрушающий контроль ультразвуковым толщиномером показал, что остаточная толщина стенок трубопроводов составила 0,8–1 мм, что ниже допустимого значения. Обнаружен сильный коррозионный износ поверхностей, наблюдается их деформация.

Согласно требованиям международного стандарта ГОСТ 32388-2013 «Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия», остаточная толщина стенки не обеспечивает несущую способность трубы диаметром 300 мм [6]. Ресурс трубопроводов этого диаметра исчерпан, требуется их замена.

В 2024 году в г. Астрахани обновлено более 9 километров сетей водоснабжения и канализации. Также продолжается и бестраншейная замена участков самотечной канализации из железобетонных труб на пластиковые. Такие меры направлены на снижение количества засоров и увеличение срока службы сетей канализации.

Анализ литературных источников показывает, что проблема количественной оценки эффективности эксплуатации изношенных коммунальных сетей с внутренними отложениями на стенках труб до конца не решена ни в одной стране мира. То есть оценка продолжительности периода остаточной эксплуатации трубопроводов коммунальной инфраструктуры – это новое научное направление науки в области инженерных сетей.

О том, что это направление новое, свидетельствует и то, что в России зарегистрировано только одно техническое решение на гидравлический способ оценки технического состояния трубопроводов коммунальных систем, защищенное патентом на изобретение [7].

Такой способ оценки технического состояния трубопроводов инженерной инфраструктуры прежде всего является гидравлическим, то есть наиболее точным, отличающимся простотой и надежностью. Требуется только знать (измерить) фактическую толщину слоя внутренних отложений  $\delta_{\phi}$  (см. рис. 1) и далее рассчитать значение величины коэффициента эффективности эксплуатации трубопровода по универсальной формуле [8]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{N_{\text{дв}}^{\text{р}}}{N_{\text{дв}}^{\text{ф}}} = \frac{(d_{\text{вн}}^{\text{р}})^2 \cdot V_{\text{р}} \cdot i_{\text{р}}}{(d_{\text{вн}}^{\text{ф}})^2 \cdot V_{\text{ф}} \cdot i_{\text{ф}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{дв}}^{\text{р(ф)}}$  – расчетное (фактическое) энергопотребление насоса, кВт·ч;  $d_{\text{вн}}^{\text{р}}$ ,  $V_{\text{р}}$ ,  $i_{\text{р}}$  – значения характеристик гидравлического потенциала новых металлических труб;  $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$ ,  $V_{\text{ф}}$ ,  $i_{\text{ф}}$  – то же изношенных труб с конкретной толщиной  $\delta_{\phi}$  слоя внутренних отложений.

Табл. 1 и 2 обеспечивают возможность прогнозирования продолжительности периода остаточной эксплуатации трубопроводов водоснабжения и водоотведения по результатам анализа значения основного критерия гидравлической эффективности эксплуатации трубопроводов  $K_{\text{эф}}$ , имеющих разную толщину слоя внутренних отложений:  $\delta$  – в водопроводных трубах и  $h$  – в сетях канализации [11, 12].

Диапазон изменения значений  $K_{эф}$  для сетей водоснабжения и теплоснабжения

Значение величины $K_{эф}$	Продолжительность периода остаточной эксплуатации водопроводных и тепловых сетей из стали и серого чугуна $T_{исп}$ , лет
$0,95 \leq K_{эф} \leq 1$	$T_{исп} \geq 10$ лет с ежегодным контролем значений фактических потерь напора $i_{ф}$ и толщины фактического слоя отложений $\delta_{ф}$
$0,90 \leq K_{эф} \leq 0,95$	$T_{исп} \geq$ не менее 5 лет с ежегодным контролем значений $i_{ф}$ и $\delta_{ф}$
$0,8 \leq K_{эф} \leq 0,90$	Трубопровод эксплуатировать нецелесообразно
$K_{эф} < 0,80$	Трубопровод эксплуатировать недопустимо

Диапазон изменения значений  $K_{эф}$  для сетей канализации

Диапазон значений $K_{эф}$	Возможность продолжения дальнейшей эксплуатации сети
$0,6 \leq K_{эф} \leq 1$	Возможно
$0,5 \leq K_{эф} < 0,6$	Требуется проведение гидродинамической очистки сети
$K_{эф} < 0,5$	Сеть эксплуатировать недопустимо Требуется проведение гидродинамической очистки сети

Далее по табл. 1 и 2 определить продолжительность периода остаточной эксплуатации  $T$  изношенных коммунальных сетей из стали и серого чугуна. Данные, приведенные в табл. 1 и 2, позволяют прогнозировать продолжительность периода остаточной эксплуатации изношенных коммунальных сетей, не доводя до наступления дорогостоящих катастрофических последствий. Кроме того, эксплуатирующие сети водо- и теплоснабжения организации могут планировать свои финансовые расходы, связанные с реконструкцией или заменой изношенных сетей на новые.

Не менее важной стороной этой проблемы является энергопотребление насосных агрегатов, изменяющееся при росте слоя фактической толщины внутренних отложений  $\delta_{ф}$  [9]. Подтверждением этого является график зависимости фактического энергопотребления насоса  $N_{дв}^{\phi}$  от фактической толщины слоя внутренних отложений (осадка) в трубах напорной канализации из работы [9]. График имеет вид зависимости  $N_{дв}^{\phi} = f(\delta_{ф})$ , кВт·ч, приведенной на рис. 2 для конкретного примера.

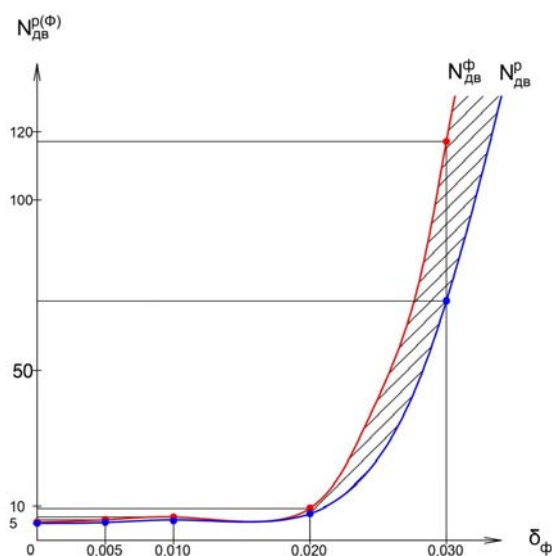


Рис. 2. Зависимость фактического энергопотребления  $N_{дв}^{\phi}$  от фактической толщины слоя внутренних отложений  $\delta_{ф}$  в стальных трубах напорной канализации

Расчетные значения  $N_{\text{дв}}^{\text{р}}$  рассчитаны по табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Значения характеристик для расчета  $N_{\text{дв}}^{\text{р}}$

$V, \text{ м/с}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$i_{\text{р}}, \text{ мм/м}$	0,00184	0,00368	0,00827	0,01473	0,02302
$N_{\text{дв}}^{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$	1,59	6,35	19,42	50,76	98,95

График (см. рис. 2), построенный по данным табл. 3, подтверждает, что чем больше значение фактической толщины слоя внутренних отложений в трубах  $\delta_{\text{ф}}$ , тем больше энергопотребление  $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$  насосного оборудования.

Значения  $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}$  по вертикальной оси на рис. 2 рассчитаны по данным табл. 2 по известной зависимости, имеющей вид формулы

$$N_{\text{дв}}^{\text{р(ф)}} = 10^6 \cdot i_{\text{р(ф)}} \cdot \left( d_{\text{вн}}^{\text{р(ф)}} \right)^2 \cdot V_{\text{р(ф)}} \cdot \frac{0,00808}{\eta}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{дв}}^{\text{р(ф)}}$  – расчетное (фактическое) значение энергопотребления насосного агрегата, кВт·ч;  $i_{\text{р(ф)}}$ ,  $d_{\text{вн}}^{\text{р(ф)}}$ ,  $V_{\text{р(ф)}}$  – расчетное (фактическое) значение характеристик новых труб (р) и труб со слоем фактических отложений  $\delta_{\text{ф}}$ ;  $\eta$  – КПД насосного агрегата.

Рассмотрим конкретный пример по данным табл. 4.

Согласно условиям задачи, по напорному коллектору диаметром  $d_{\text{вн}}=400$  мм из стальных электросварных труб (ГОСТ 10704-91) перекачивается расход сточной жидкости  $q=0,11 \text{ м}^3/\text{с}$  (110 л/с). Толщина фактического (измеренного) слоя осадка на внутренних стенках труб  $\delta = 30$  мм.

Необходимо рассчитать и сравнить значения энергопотребления насосного агрегата для новых стальных труб и труб со слоем отложений  $\delta=30$  мм (0,03 м).

Требуется построить графики зависимости:  $N_{\text{дв}}^{\text{р(ф)}} = f(\delta_{\text{ф}})$ . Показать графически изменение энергозатрат насосного агрегата  $N_{\text{дв}}$  при заданных условиях.

Т а б л и ц а 4

Гидравлические характеристики новых труб и труб  
с разной толщиной слоя отложений  
Результаты сравнения гидравлических характеристик труб

$q, \text{ м}^3/\text{с}$	Толщина слоя внутренних отложений $\delta_{\text{ф}}, \text{ м}$	Значения характеристик гидравлического потенциала труб			Фактические энергозатраты насосного агрегата $N_{\text{дв}}^{\text{ф}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$
		$d_{\text{вн}}^{\text{ф}}, \text{ м}$	$V_{\text{ф}}, \text{ м/с}$	$i_{\text{ф}}, \text{ м/м}$	
0,11	0	0,3864	0,94	0,00325	5,264
	0,005	0,3764	0,99	0,00373	6,045
	0,010	0,3664	1,04	0,00427	6,880
	0,020	0,3464	1,17	0,00581	9,413
	0,030	0,3264	1,32	0,07226	117,268

Формула (2) позволяет определять (фактическое) энергопотребление насосов по рассчитанным или измеренным значениям характеристик гидравлического потенциала труб:  $d_{\text{вн}}^{\text{р(ф)}}$ ,  $V_{\text{р(ф)}}$ ,  $i_{\text{р(ф)}}$  [10].

Принято считать, что слой внутренних отложений на стенках металлических труб  $\delta_{\text{ф}}$  изменяет значение фактического внутреннего диаметра труб  $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$ , который, по

экспертным мнениям специалистов, может изменяться не более чем 5 % от расчетного значения  $d_{\text{вн}}^p$ , то есть

$$d_{\text{вн}}^{\phi} = 0,95 \cdot d_{\text{вн}}^p, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{вн}}^{\phi}$  – фактический диаметр труб со слоем отложений  $\delta_{\phi}$ , м;  $d_{\text{вн}}^p$  – внутренний диаметр труб по ГОСТ, м,

$$d_{\text{вн}}^{\phi} = d_{\text{вн}}^p - 2\delta_{\phi}, \text{ м}; \quad (4)$$

здесь  $\delta_{\phi}$  – толщина слоя внутренних отложений, м,

$$\delta_{\phi} = d_{\text{вн}}^p - d_{\text{вн}}^{\phi}, \text{ м}. \quad (5)$$

С учетом формулы (3), согласно гидравлической точке зрения, существует предельно допустимая толщина слоя внутренних отложений в металлических трубах коммунальной инфраструктуры.

В табл. 5 приведены характеристики стальных электросварных прямошовных водопроводных труб по ГОСТ 10704-91.

Т а б л и ц а 5

Характеристика стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-91

Наружный диаметр труб $d_n$ , мм	Толщина стенки $S_p$ , мм	Внутренний расчетный диаметр $d_p$ , мм	Допустимая толщина слоя отложений $\delta_{\text{доп}}$ , мм	Фактический внутренний диаметр труб с отложениями $d_{\phi}$ , мм
70	2,5	65	3,3	58,4
76	2,5	71	3,6	63,8
89	2,5	74	3,7	81,6
102	3,0	96	4,8	92,4
121	3,0	115	5,8	109,4
140	3,0	134	6,7	120,6
159	4,5	150	7,5	135,0
168	4,5	159	8,0	143,0
180	4,5	171	8,6	153,8
219	4,5	210	10,5	189,0
273	6,0	261	13,1	234,8
325	7,0	311	15,6	279,8
377	7,0	363	18,1	344,9
426	7,0	412	20,6	370,8
480	7,0	466	23,3	442,7
530	7,0	516	25,8	490,2
630	7,0	616	30,8	585,2
720	7,0	706	35,3	670,7
820	8,0	804	40,2	763,8
920	8,0	904	45,2	853,8
1020	8,0	1004	50,2	953,8
1220	9,0	1202	60,1	1141,9
1420	10,0	1400	70,0	1330,0

Таким образом, эффективным с гидравлической точки зрения считается трубопровод, обладающий минимальными потерями напора на сопротивление по всей длине (гидравлическим уклоном), характеризующийся эффективной скоростью потока  $V$  и эффективным внутренним диаметром  $d_{\text{вн}}$  (без внутренних отложений) [13]. Поэтому

количественная оценка эффективности эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения необходима и актуальна, так как такая оценка позволяет прогнозировать изменение значений характеристик гидравлического потенциала труб в процессе их жизненного цикла на стадии «эксплуатация» и в итоге определять продолжительность периода их остаточной эксплуатации до замены труб на новые [1, 2].

Количественная оценка эффективности эксплуатации трубопроводов позволяет проводить:

- разработку прогнозов значений характеристик гидравлического потенциала металлических труб;
- совершенствование общепринятых методик гидравлического расчета трубопроводов водоснабжения и канализации с учетом толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб.

Согласно выводам, приведенным в работе [11], количественная оценка гидравлической эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения по величине значения  $K_{эф}$  (формула (1)) позволяет определить по специальным табл. 1 и 2 продолжительность периода остаточной эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения и тепловых сетей до выполнения их гидродинамической очистки или полного снятия с эксплуатации [12].

#### Выводы:

1. Табл. 1 и 2 являются обобщением результатов исследований, которые проводились автором на протяжении последних нескольких лет.

2. Предложенная методика количественной оценки эффективности эксплуатации сетей водоснабжения, канализации и тепловых сетей с внутренними отложениями по значению коэффициента гидравлической эффективности эксплуатации трубопроводов  $K_{эф}$  обеспечивает возможность:

- проведения анализа значений характеристик гидравлического потенциала труб с разной толщиной слоя внутренних отложений, влияющих на величину энергопотребления напорных систем водоснабжения, с целью определения необходимости выполнения гидродинамической очистки самотечных сетей канализации и тепловых сетей;
- прогнозирования значений характеристик гидравлического потенциала труб с разной толщиной слоя внутренних отложений, а также фактического энергопотребления насосных агрегатов в напорных сетях водоснабжения и теплоснабжения;
- определения продолжительности периода остаточной эксплуатации до проведения реконструкции сетей водоснабжения и тепловых сетей или гидродинамической очистки сетей канализации с разной толщиной слоя внутренних отложений.

3. Количественная оценка гидравлической эффективности эксплуатации трубопроводов водоснабжения, канализации и тепловых сетей с внутренними отложениями является «ключом» к разработке прогноза значений характеристик гидравлического потенциала труб водопроводных и тепловых сетей. Это необходимо для определения значений фактического энергопотребления насосного оборудования или для обоснования проведения гидродинамической очистки самотечных канализационных сетей с отложениями осадка в лотковой части труб.

4. Предлагаемый подход к оценке эксплуатации инженерных сетей водоснабжения, канализации и тепловых сетей также обеспечивает возможность прогноза продолжительности периода остаточной эксплуатации таких инженерных сетей с внутренними отложениями на рабочей поверхности труб.

#### Список литературы

1. Продоус, О.А. Гидравлический расчет сетей водоотведения с внутренними отложениями : монография / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков. – Санкт-Петербург – Москва : Издательство МИСИ-МГСУ, 2022. – 120 с.

2. Продоус, О.А. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб. Терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации / О.А. Продоус, П.П. Якубчик, Д.И. Шлычков. – Санкт-Петербург – Москва : Перо, 2023. – 288 с.
3. Продоус, О.А. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков, П.П. Якубчик, С.В. Пархоменко // Вестник МГСУ. – 2022. – Т.17, вып. 6. – С. 738–746.
4. Продоус, О.А. Влияние толщины слоя отложений в водопроводных сетях и сетях водоотведения на характеристики их гидравлического потенциала / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24, вып. 6. – С. 129–138.
5. Отчет по НИР «Определение необходимости и направлений реконструкции систем водоснабжения и водоотведения муниципального образования «Город Астрахань». – Астрахань, 2020. – 170 с.
6. ГОСТ 32388-2013. Международный стандарт. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 109 с.
7. Патент на изобретение № 2822440. Способ оценки технического состояния трубопровода : заявка № 2023135196. Приоритет 25.12.2023. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05.07.2024 г. / Продоус О.А., Шлычков Д.И., Шестаков А.А.
8. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб : справочное пособие / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – Москва : Бастет, 2020. – 428 с.
9. Федоров, Н.Ф. Гидравлический расчет канализационных сетей (Расчетные таблицы) / Н.Ф. Федоров, Л.Е. Волков. – 4-е изд., испр. – Ленинград : Стройиздат, 1968. – 252 с.
10. Лукиных, А.А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского / А.А. Лукиных, Н.А. Лукиных. – 4-е изд., доп. – Москва : Стройиздат, 1974. – 160 с.
11. Shlychkov, D. Hydraulic characteristics of sewer pipelines with internal deposits / D. Shlychkov, A. Chelonenko // Collection E3S Web of Conferences. – 2023. – 460. – 08002. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346008002>
12. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. Издание официальное. – Москва, 2018. – 70 с.
13. Исаев, В.Н. Оценка эксплуатационных качеств систем водоснабжения. Инструмент для успешного проведения реформы ЖКХ / В.Н. Исаев, В.М. Калинин // Сантехника. – 2006. – №2. – URL: <https://clck.ru/3GiFu6>.

## References

1. Prodous, O.A. Hydraulic calculation of drainage networks with internal deposits : The monograph / O.A. Prodous, D.I. Shlychkov. – St. Petersburg – Moscow : MISI-MGSU Publishing House, 2022. – 120 p.
2. Prodous, O.A. Features of hydraulic calculation of water pipes from metal, polymer and metal polymer pipes. Terminological dictionary of external water supply and sewerage networks / O.A. Prodous, P.P. Yakubchik, D.I. Shlychkov. – St. Petersburg – Moscow : Pen, 2023. – 288 p.
3. Prodous, O.A. Influence of the thickness of the layer of internal sediments in pipelines of water supply and sanitation systems on the duration of their residual operation / O.A. Prodous, D.I. Shlychkov, P.P. Yakubchik, S.V. Parkhomenko // Bulletin of MGSU. – 2022. – Vol.17, issue 6. – P. 738–746.
4. Prodous, O.A. Influence of the thickness of the sediment layer in water supply and sanitation networks on the characteristics of their hydraulic potential / O.A. Prodous,

D.I. Shlychkov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2022. – Vol. 24, issue 6. – P. 129–138.

5. Research report «Determining the necessity and directions of reconstruction of water supply and sanitation systems of the municipal formation «City of Astrakhan». – Astrakhan, 2020. – 170 p.

6. GOST 32388-2013. The international standard. Technological pipelines. Norms and methods of calculation for strength, vibration and seismic effects. – Moscow : Standartinform, 2016. – 109 p.

7. Patent for invention No. 2822440. A method for assessing the technical condition of a pipeline. Application No. 2023135196. Priority is 12/25/2023. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation 05.07.2024 / Prodous O.A., Shlychkov D.I., Shestakov A.A..

8. Shevelev, F.A. Tables for hydraulic calculation of water pipes : Reference manual / F.A. Shevelev, A.F. Shevelev. – Moscow : Bastet, 2020. – 428 p.

9. Fedorov, N.F. Hydraulic calculation of sewer networks (Calculation tables) / N.F. Fedorov, L.E. Volkov. – 4th ed., ispr. – Leningrad : Stroyizdat, 1968. – 252 p.

10. Lukinykh, A.A. Tables for the hydraulic calculation of sewer networks and duckers according to the formula of academician N.N. Pavlovsky / A.A. Lukinykh, N.A. Lukinykh. – 4th ed., supplement. – Moscow : Stroyizdat, 1974. – 160 p.

11. Shlychkov, D. Hydraulic characteristics of sewer pipelines with internal deposits / D. Shlychkov, A. Chelonenko // Collection E3S Web of Conferences. – 2023. – 460. – 08002. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346008002>

12. SP 32.13330.2018. Sewerage. Outdoor networks and structures. Updated edition of SNiP 2.04.03-85. The publication is official. – Moscow, 2018. – 70 p.

13. Isaev, V.N. Evaluation of the operational qualities of water supply systems. A tool for the successful implementation of housing and communal services reform / V.N. Isaev, V.M. Kalinin // Plumbing. – 2006. – No. 2. – URL: <https://clck.ru/3GiFu6>.



Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г.Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна**,  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Информационное  
обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

Penza State university

Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Ponomareva Inna Konstantinovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Information Support  
Management and Production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ КЛИМАТИЗАЦИИ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ

И.К. Пономарева

Рассмотрены разработанные автором принципы климатизации в православных культовых сооружениях. На основе проведенных исследований создано техническое устройство, изложена методика расчета воздухообмена для ассимиляции копоти и сажи в зале богослужения. Разработаны система вентиляции по типу вытесняющей и схема воздухообмена снизу вверх, а также местная механическая вытяжная система вентиляции для улавливания и удаления копоти и сажи в виде подсвечника с зонтом и техническое устройство над отопительным прибором с горизонтальной направляющей с дугой внутри для обеспечения отклонения загрязненного конвективного потока от внутренней поверхности наружной стены, на которой размещено убранство, вовнутрь зала богослужения. Предложенные принципы и техническое устройство направлены на создание требуемых параметров климатизации для сохранения историко-культурных ценностей в православных сооружениях и сокращения финансовых затрат на выполнение реставрационных работ.

*Ключевые слова:* климатизация, микроклимат, конвективный поток, вытесняющая вентиляция, техническое устройство, копоть и сажа, культурное наследие, воздухообмен, нормативно-правовая база, подсвечник, вытяжной зонт, отопительный прибор, убранство, зал богослужения

## DEVELOPMENT OF INNOVATIVE PRINCIPLES OF CLIMATIZATION IN ORTHODOX RELIGIOUS BUILDINGS

I.K. Ponomareva

This article discusses the principles of air-conditioning in Orthodox religious buildings developed by the author. Based on the research a technical device has been developed, and a methodology for calculating air exchange for the assimilation of soot and carbon black in the worship hall has been presented. A ventilation system has been developed based on the «displacement» type and the «bottom-up» air exchange scheme, a local mechanical exhaust ventilation system for capturing and removing soot and carbon black in the form of a candlestick with an umbrella, and a technical device above the heating device with a horizontal guide with an arc inside to ensure the deviation of the polluted convective flow from the inner surface of the outer wall on which the decoration is located, into the worship hall. The proposed principles and technical device are aimed at creating the required air-conditioning parameters and, as a consequence, preserving historical and cultural values in Orthodox buildings, and reducing financial costs of restoration work.

*Keywords:* air conditioning, microclimate, convective flow, displacement ventilation, technical device, soot and carbon black, cultural heritage, air exchange, regulatory framework, candlestick, exhaust hood, heating device, decoration, worship hall

Сохранение историко-культурного наследия в православных сооружениях является актуальной задачей в связи со старением убранства и масштабностью проведения реставрационных работ, а также экономическими затратами на их выполнение и неэффективностью системы климатизации в православных храмах, соборах и церквях. Особенностью православных соборов, храмов и церквей является наличие в алтаре, зале богослужения, притворе произведений архитектуры, художественной росписи, в том числе икон, фресок, золочения и т.п., имеющих историческую, художественную и культурную ценность. Для сохранения убранства требуются особые параметры и условия поддержания микроклимата в залах богослужения.

Православные сооружения являются носителем не только религиозной, но и культурной ценности для православных верующих и граждан, лояльно относящихся к христианской религии. Подобные культурные сооружения для богослужения располагаются и в странах Европы. Спецификой православных сооружений является круглогодичное богослужение, нахождение большого количества прихожан и наличие горящих церковных свечей. В результате горения свечей и лампадного масла выделяется большое количество копоти, сажи, влаги и газов. Особенно разрушительным являются поляризованная копоть и сажа, которые в результате статического потенциала оседают на поверхности убранства и наносят ему серьезный ущерб, требующий существенных экономических затрат на реставрационное восстановление первоначального состояния. Исследования показали, что существующие системы климатизации не обеспечивают сохранность культурного наследия, поэтому необходимы более эффективные технические решения для борьбы с вредностями от горящих церковных свечей и лампад [1, 2].

Это особенно актуально с началом активного строительства новых, воссоздания и реконструкции разрушенных соборов, церквей, проведения реставрационных работ убранства, имеющего историческую, художественную и культурную ценность. Наряду с этим важно отметить, что ремонтно-восстановительные работы и работы по воссозданию конструкций храмов и соборов, а также выполнение реставрационных работ убранства должны основываться на нормативно-правовой базе для получения разрешения и расчетно-сметной стоимости работ, необходимых для заключения договоров между заказчиком и подрядчиком [3].

Автором была проанализирована нормативно-правовая база для выполнения организационных, разрешительных, строительных, реставрационных и исследовательских работ, утвержденная Минстроем России, федеральными законами и другими законодательными актами.

Важно отметить, что в соответствии с требованиями ст. 42 Федерального закона от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» к ремонтным работам на объектах культурного наследия относятся также научные и исследовательские изыскания, необходимые для проведения реставрационных работ с целью поддержания в эксплуатационном состоянии памятников, составляющих предмет охраны.

Выдача разрешения на проведение работ по сохранению объекта культурного наследия осуществляется в соответствии с Порядком выдачи разрешений на проведение работ по сохранению объекта культурного наследия, включенного в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации, или выявленного объекта культурного наследия, утвержденным приказом Министерства культуры Российской Федерации от 21.10.2015 № 2625.

В настоящее время принят ряд государственных стандартов, подлежащих применению при проведении работ, например национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 55528-2013 «Состав и содержание научно-проектной документации по сохранению объектов культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 28.08.2013 № 593-ст).

Практика показала, что проведение исследований, внедрение разработанных научно-технических решений становятся затруднительными, требующими решения многих процедурных вопросов. Предлагаемая нормативно-правовая информация не позволяет решить организационные вопросы и в короткие сроки приступить к реализации исследований и работ. Вместе с тем научно-исследовательские и реставрационные мероприятия в отношении разработки и исследования систем климатизации объектов культурного наследия православных сооружений проводились исключительно в рамках законодательства РФ. Для поддержания в зале богослужения требуемого микроклимата применяются системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Известно, что расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха в зале богослужения осуществляется исходя из максимальных воздухообменов, полученных для ассимиляции поступающих в зал вредных веществ [4].

Объем приточного воздуха для разбавления выделяющейся теплоты от различных источников рассчитывается по формуле

$$L_{\text{пр}} = \frac{3,6 \sum Q_{\text{ти}}}{(i_{\text{yx}} - i_{\text{пр}}) \cdot \rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где  $\sum Q_{\text{ти}}$  – суммарные теплоубытки в зале богослужения, Вт;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $i_{\text{yx}}, i_{\text{пр}}$  – значения уходящего и приточного воздуха, кДж/кг.

Расчет приточного воздуха для ассимиляции водяного пара рекомендуется определять по формуле

$$L_{\text{пр}} = \frac{\sum g_{\text{w}}}{(\alpha_{\text{yx}} - \alpha_{\text{пр}}) \cdot \rho_{\text{в}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где  $\sum g_{\text{w}}$  – суммарные влаговыделения в зале богослужения, кг/ч;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_{\text{yx}}, \alpha_{\text{пр}}$  – влагосодержание уходящего и приточного воздуха, кДж/кг.

Расчет объема приточного воздуха для разбавления углекислого газа, выделяющегося в зале богослужения, осуществляется по формуле

$$L_{\text{пр}} = \frac{\sum g_{\text{CO}_2}}{(C_{\text{в}} - C_{\text{пр}})}, \text{ л/ч}, \quad (3)$$

где  $\sum g_{\text{CO}_2}$  – количество углекислого газа, выделяемого прихожанами и при сгорании свечей и лампадного масла в кадилах л/ч;  $C_{\text{в}}, C_{\text{пр}}$  – концентрация углекислого газа внутреннего и приточного воздуха, л/м<sup>3</sup>.

В то же время при расчете воздухообмена в зале богослужения не учитывается концентрация копоти и сажи, выделяющихся при сгорании церковных свечей и лампадного масла в кадилах. Анализ исследований микроклимата в православных храмах позволяет сделать вывод, что существующая методика расчета воздухообмена не обеспечивает создания условий сохранения убранства в зале богослужения. Автором статьи для эффективной борьбы с вредностями разработана методика расчета для определения концентрации копоти и сажи, выделяющихся при сгорании свечей и лампадного масла в кадилах.

Расчет воздухообмена  $L_{\text{кс}}, \text{ м}^3/\text{ч}$ , для ассимиляции копоти и сажи в воздухе зала богослужения предлагается производить по формуле

$$L_{\text{кс}} = \frac{\sum g_{\text{кс}}}{(C_{\text{yx}} - C_{\text{пр}})}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4)$$

где  $\sum g_{\text{кс}}$  – объем копоти и сажи, выделяющихся в зале богослужения при сжигании свечей и лампадного масла, гр/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{yx}}$  – объемная концентрация копоти и сажи в

удаляемом воздухе,  $\text{мг/м}^3$ ;  $C_{\text{пр}}$  – объемная концентрация копоти и сажи в приточном воздухе,  $\text{мг/м}^3$ .

Для исключения рассеивания вредностей в воздушном пространстве зала богослужения, их локализации и удаления традиционно в православных храмах применяется общеобменная механическая в сочетании с естественной приточно-вытяжная вентиляция. Автором предлагается применение инновационной системы по типу местной вытяжной вентиляции с использованием технического устройства в виде вытяжного зонта, установленного над подсвечником в зоне горения свечей и лампадного масла (рис. 1, 2) [5].

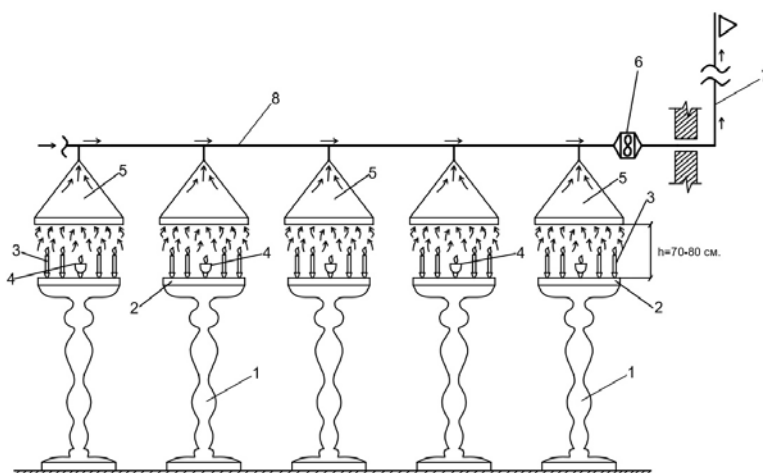


Рис. 1. Схема местной вытяжной системы вентиляции с использованием вытяжных зонтов и верхней прокладкой магистрального воздуховода:

1 – стойка подсвечника; 2 – столешница; 3 – свеча; 4 – лампада; 5 – вытяжной зонт; 6 – осевой вентилятор; 7 – выход загрязненного воздуха в атмосферу; 8 – магистральный воздуховод;  
 $h$  – расстояние от столешницы до нижней кромки зонта

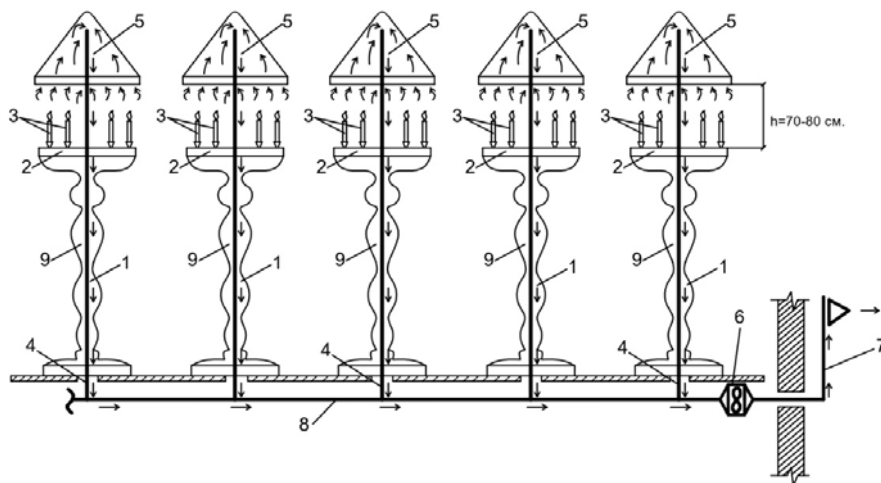


Рис. 2. Схема местной вытяжной системы вентиляции с использованием вытяжных зонтов и нижней прокладкой магистрального воздуховода:

1 – стойка подсвечника; 2 – столешница; 3 – свеча; 4 – отверстие в полу; 5 – вытяжной зонт; 6 – осевой вентилятор; 7 – выход загрязненного воздуха в атмосферу; 8 – магистральный воздуховод; 9 – вытяжная труба внутри стойки подсвечника;  
 $h$  – расстояние от столешницы до нижней кромки зонта

В указанной системе вентиляции все подсвечники рекомендуется устанавливать в одну линию вдоль внутренней поверхности наружной стены зала богослужения на расстоянии удобном и безопасном для прихожан. Выделяющиеся вредности при сгорании свечей и масла в лампаде из зонтов поступают в вытяжную систему магистрального воздуховода и далее с использованием осевого канального вентилятора удаляются в атмосферу через воздуховод, проложенный на наружной поверхности стены. Предлагаемая местная вытяжная система вентиляции обеспечит комфортные условия для прихожан и сохранит историко-культурное наследие и художественные ценности в зале богослужения церкви, храма и собора. Вытяжные зонты и воздухопроводы должны быть художественно оформлены и иметь привлекательный внешний вид, а также не нарушать интерьер зала богослужения.

На основе проведенных исследований разработана система местной вытяжной вентиляции с техническим устройством в виде зонтика с подсвечником для улавливания и удаления копоти и сажи и других вредностей от горящих церковных свечей и лампадного масла для Спасского кафедрального собора г.Пензы (рис. 3).

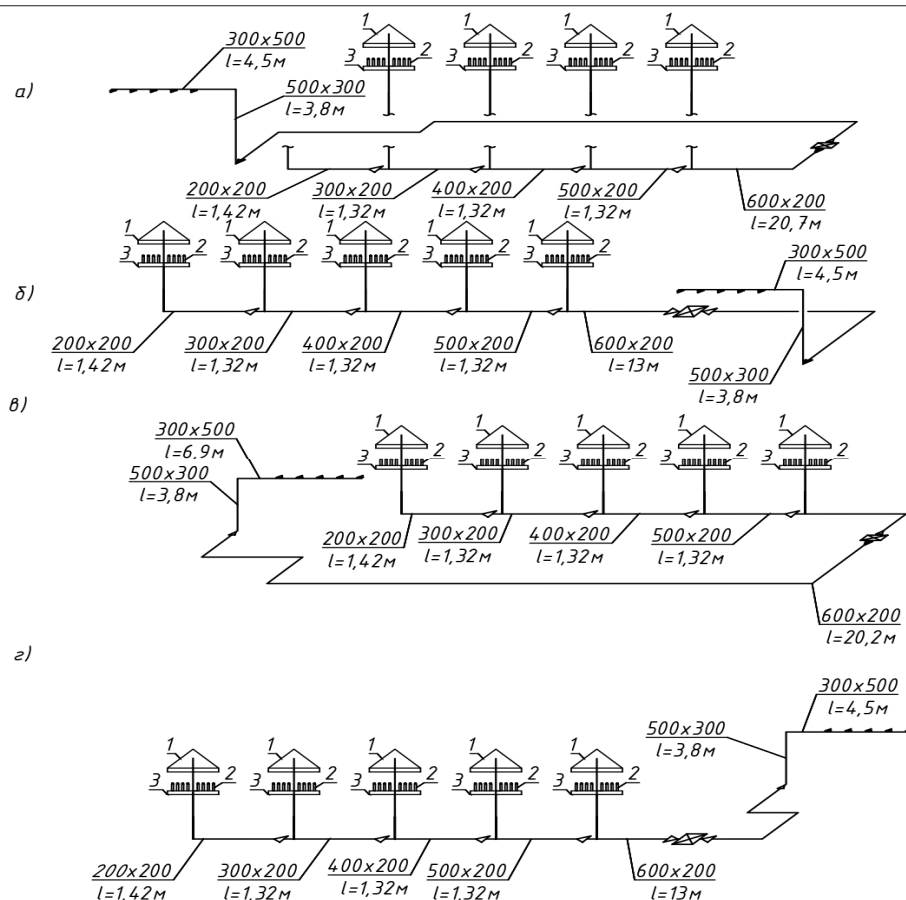


Рис. 3. Схемы систем местной вытяжной вентиляции с техническим устройством в виде зонтика с подсвечником для улавливания и удаления копоти и сажи от горящих церковных свечей в Спасском кафедральном соборе города Пензы:

- а – система вытяжной вентиляции В1; б – система вытяжной вентиляции В2;  
в – система вытяжной вентиляции В3; г – система вытяжной вентиляции В4;  
1 – вытяжной зонт; 2 – церковные свечи; 3 – столешница подсвечника

Данное решение способствует обеспечению на протяжении всего периода богослужения требуемого микроклимата и чистоту внутреннего воздуха.

Другое техническое устройство (рис. 4), разработанное в виде горизонтальной направляющей с дугой внутри, обеспечивает отклонение загрязнения конвективного потока от отопительного прибора вовнутрь помещения к середине зала, где сливается с общими восходящими конвективными потоками в зале богослужения.

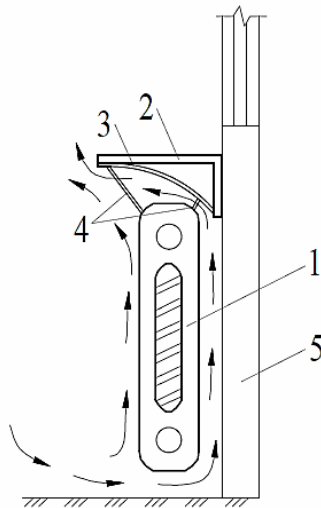


Рис. 4. Техническое устройство в виде горизонтальной направляющей с дугой внутри:  
1 – отопительный прибор у наружной стены; 2 – горизонтальная направляющая с дугой внутри; 3 – внутренняя дуга; 4 – кронштейн для крепления; 5 – наружная стена

Структура движения конвективного потока от поверхности отопительного прибора приведена на рис. 5 [5].

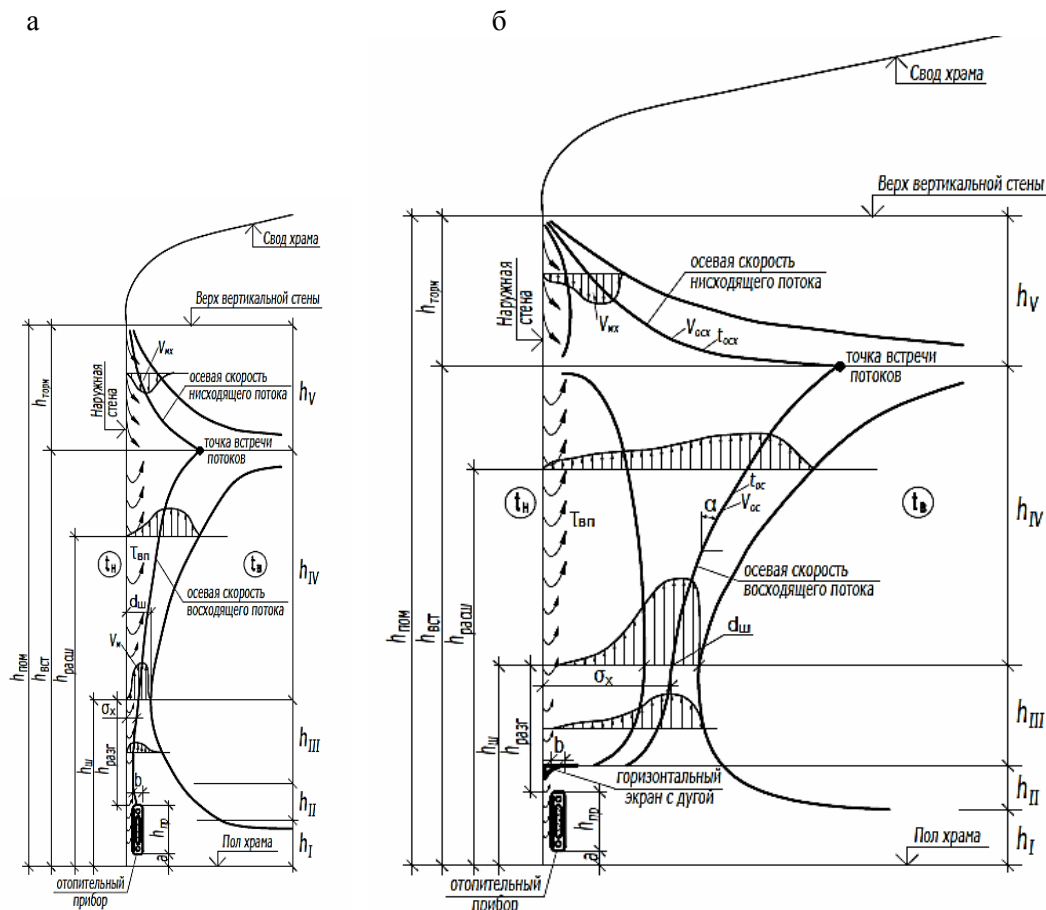


Рис. 5. Схема движения конвективного потока от поверхности отопительного прибора:  
1 – отопительный прибор; 2 – нагретый конвективный поток;  
а – отопительный прибор без теплоотражающего экрана;  
б – отопительный прибор с теплоотражающим экраном

Проведенные исследования доказали эффективность применения данного технического устройства. Загрязненный конвективный поток не достигает внутренней поверхности стены, на которой размещено убранство зала богослужения. Приведенные выше технические устройства в виде зонта с подсвечником и горизонтальной направляющей с дугой внутри запатентованы автором.

Для обеспечения высокого качества воздуха в зале богослужения и снижения его загрязнения копотью и сажой предлагается использовать систему климатизации по типу вытесняющей вентиляции и схему воздухообмена снизу вверх. Применительно к зданиям различного назначения в последние годы АВОК разработаны справочные и нормативные документы по проблемам эксплуатации вытесняющей вентиляции, в то же время отсутствуют рекомендации и нормативные документы по принципу использования вытесняющей вентиляции для православных культовых сооружений. В результате малой изученности принципа применения вытесняющей вентиляции в залах православных культовых сооружений продолжают использовать и проектировать системы вентиляции и кондиционирования воздуха перемешивающего типа. В этом случае происходит смешивание загрязненного копотью и сажой внутреннего воздуха с чистым приточным воздухом в нижней зоне зала богослужения. В результате не обеспечиваются создание комфортных условий для прихожан и сохранение архитектурных и историко-культурных ценностей в залах богослужения. Это наносит серьезный урон убранству и приводит к финансовым затратам, частым циклам реставрационных работ по восстановлению внутреннего облика залов богослужения.

В данной статье предлагается использовать вытесняющую вентиляцию по принципу подачи приточного воздуха в нижнюю зону зала богослужения на отметке до 0,5 м от пола через воздухораспределитель с соударяющимися струями при скорости приточного воздуха 0,2-0,3 м/с.

Решение системы кондиционирования воздуха по типу вытесняющей вентиляции и схема движения потоков воздуха показаны на рис. 6 на примере Спасского кафедрального собора в г. Пензе.

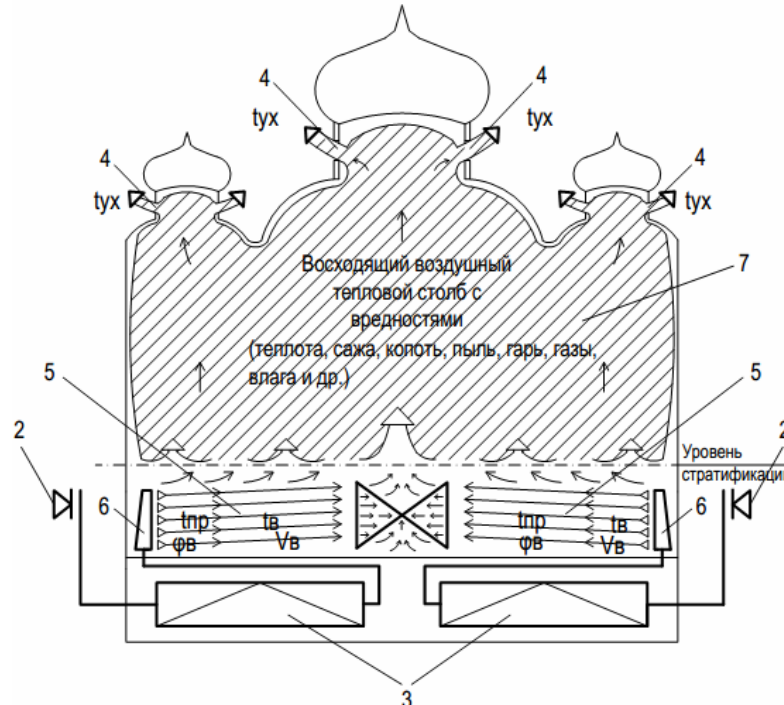


Рис. 6. Схема движения воздушного теплового потока в зале богослужения Спасского кафедрального собора в г. Пензе:

1 – зал богослужения собора; 2 – воздухозаборная шахта; 3 – установки кондиционирования воздуха; 4 – световой проем с автоматизированным притвором; 5 – зона чистого приточного воздуха; 6 – воздухораспределительный канал; 7 – верхняя воздушная загрязненная зона

При данной схеме воздухообмена (см. рис. 6) по принципу вытесняющей вентиляции воздух забирается с улицы через шахту и подается в нижнюю зону, а удаляется сверху через притворы световых проемов, установленных в барабанах главного и малого куполов. Установлено, что при вытесняющей вентиляции струи приточного воздуха с низкой турбулентностью и скоростью 0,2–0,3 м/с подхватывают окружающий нижний загрязненный воздух из помещения и не способствуют перемешиванию приточного (чистого) воздуха с внутренним загрязненным воздухом помещения.

В результате проведенных исследований было установлено, что «столб» загрязненного восходящего потока теплого воздуха формируется ближе к середине зала и не омывает стены, иконы, фрески, архитектурные элементы, золочение, роспись и т.п., при этом сохраняется их привлекательный вид и существенно сокращаются финансовые затраты на выполнение реставрационных работ.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Создание требуемых параметров климатизации в православных культовых сооружениях является актуальной задачей сохранения историко-культурного наследия.
2. Проведенные натурные исследования в ряде культовых православных сооружений показали, что системы климатизации не обеспечивают условий, необходимых для сохранности убранства в залах богослужения.
3. Анализ имеющейся нормативно-правовой базы по выполнению организационных, реставрационных, исследовательских работ на объектах культурного наследия выявил ряд ограничений, касающихся культовых православных сооружений. Нормативно-правовая база перегружена ограничениями и требованиями, иногда исключаящими друг друга. В связи с этим назревает необходимость корректировки разделов, касающихся разработки современных решений по климатизации, направленных на обеспечение сохранности убранства в церквях, храмах и соборах.
4. В результате проведенных исследований разработаны инновационные принципы климатизации в православных храмах в виде технических устройств и уточнена методика расчета воздухообмена, что способствует обеспечению параметров климатизации и, как следствие, сохранности объектов историко-культурного наследия.
5. Предложенные технические устройства позволяют локализовать и удалить копоть, сажу, влагу, газы из мест их образования, не допустить их попадания на поверхность убранства в зале богослужения.

### Список литературы

1. Болотов, Е.Н. Храмы православные. Как сохранить наследие / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2024. – № 3. – С. 180–186.
2. Болотов, Е.Н. Сохранение наследия: микроклимат музеев / Е.Н. Болотов // АВОК. – 2018. – № 1. – С. 170–176.
3. Табунщиков, Ю.А. Оптимальные параметры внутреннего воздуха исторических зданий: методика определения / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2018. – № 3. – С. 148–155.
4. Патент на изобретение RU 2773457 C1, 03.06.2022. Заявка № 2021115913 от 01.06.2021. Способ сбора и отвода дыма, копоти, сажи при сгорании свечей от группы подсвечников, установленных в храмах, соборах и других культовых сооружениях / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А., Багдасарян А.Г.
5. Патент на полезную модель RU 232782 U1, 20.03.2025. Заявка № 2024100832 от 10.01.2024. Подсвечник для культовых сооружений / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К.
6. Патент на полезную модель RU 214332 U1, 21.10.2022. Заявка № 2022114945 от 01.06.2022. Чугунный секционный радиатор с направляющей / Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К.



## References

1. Bolotov, E.N. Orthodox churches. How to preserve the legacy / E.N. Bolotov // AVOK. – 2024. – No. 3. – P. 180–186.
2. Bolotov, E.N. Preservation of heritage: microclimate of museums / E.N. Bolotov // AVOK. – 2018. – No. 1. – P. 170–176.
3. Tabunshchikov, Yu.A. Optimum parameters of indoor air in historical buildings: determination methodology / Yu.A. Tabunshchikov, M.M. Brodach // AVOK. – 2018. – No. 3. – P. 148–155.
4. Patent for invention RU 2773457 C1, 03.06.2022. Application No. 2021115913 dated 01.06.2021. Method of collecting and removing smoke, soot, carbon during candle combustion from a group of candlesticks installed in churches, cathedrals and other religious buildings / Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K., Petrova K.A., Bagdasaryan A.G.
5. Patent for utility model RU 232782 U1, 20.03.2025. Application No. 2024100832 dated 10.01.2024. Candlestick for religious buildings / Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K.
6. Utility model patent RU 214332 U1, 10/21/2022. Application No. 2022114945 dated 06.01.2022. Cast iron sectional radiator with a guide / Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K.

# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 719:726.04

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_192

*Рязанский институт (филиал) Московского  
политехнического университета*

Россия, 390000, г. Рязань,  
ул. Право-Лыбедская, д. 26/58,  
тел.: +7 (4912) 25-41-48

**Князева Марина Вячеславовна,**  
кандидат исторических наук,  
доцент кафедры «Промышленное  
и гражданское строительство»  
E-mail: marina1859@mail.ru

ООО «ПРОЕКТСЕРВИС»  
Россия, 390023, Рязанская область,  
г. Рязань, ул. Есенина, д. 29

**Казакова Яна Андреевна,**  
проектировщик  
E-mail: martinkazakova@yandex.ru

*Ryazan Institute (branch) of Moscow  
Polytechnic University*

Russia, 390000, Ryazan,  
26/58, Pravo-Lybedskaya St.,  
tel.: +7 (4912) 25-41-48

**Knyazeva Marina Vyacheslavovna,**  
Candidate of History Sciences, Associate  
Professor of the Department «Industrial and  
Civil Engineering»  
E-mail: marina1859@mail.ru

ООО PROEKTSERVIS  
Russia, 390023, Ryazan Region, Ryazan,  
29, Yesenina St.

**Kazakova Yana Andreevna,**  
Designer  
E-mail: martinkazakova@yandex.ru

## ПРОБЛЕМА УВЕКОВЕЧИВАНИЯ РАЗРУШЕННЫХ ХРАМОВ: УТРАЧЕННЫЕ ХРАМЫ РЯЗАНИ КАК ОБЪЕКТЫ РЕЛИГИОЗНОГО ТУРИЗМА И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

М.В. Князева, Я.А. Казакова

Анализируются конфессиональные памятники архитектуры города Рязани по степени их сохранности и размещению в городском пространстве. Обосновываются проблемы сохранения памяти о разрушенных храмах, оцениваются возможности установки памятных мест. Развитие туристического потенциала предлагается рассматривать по актуализации историко-архитектурного наследия.

*Ключевые слова: утраченные храмы, религиозный туризм, историко-архитектурное наследие, храмовое зодчество, региональное значение*

## THE PROBLEM OF PERPETUATING DESTROYED TEMPLES: THE LOST TEMPLES OF RYAZAN AS OBJECTS OF RELIGIOUS TOURISM AND CULTURAL HERITAGE

М.В. Knyazeva, Y.A. Kazakova

Confessional architectural monuments of the city of Ryazan are analyzed according to the degree of their preservation and placement in urban space. The problems of preserving the memory of destroyed temples are substantiated, and the possibilities of installing memorials are evaluated. The development of tourism potential is proposed to consider through the actualization of historical and architectural heritage.

*Keywords: lost temples, religious tourism, historical and architectural heritage, temple architecture, regional significance*

**Введение.** Всем известно, что XX век ознаменовался антирелигиозной политикой, приведшей к тяжелым последствиям. После Октябрьской революции 1917 г. на протяжении не одного десятилетия, происходили серьезные гонения на церковь и священнослужителей. Старейшие памятники церковной архитектуры (церкви, колокольни, монастыри, часовни) разрушались или приспособлялись под другие нужды. В результате многие города России, в том числе и Рязань, утратили свой неповторимый облик. Именно храмы представляли «лицо» города, являлись его визитной карточкой [1].

В 1991 г. Рязанской епархией было решено реконструировать церковные сооружения. Многие здания были отремонтированы и приведены в надлежащий вид, однако часть из них так и не была восстановлена.

Тема восстановления разрушенных храмов в России поднималась неоднократно в исследованиях отечественных и зарубежных авторов. В воссоздание культового историко-архитектурного прошлого Рязани большой вклад внесли И.В. Добролюбов, Н.Н. Аграмаков, Г.К. Вагнер, С.В. Чугунов [2-6]. Информацию о разрушенных храмах можно найти в исследованиях Ю. Орловой, Т. Синельниковой, Е. Александрова [7-10] и других исследователей.

*Цель исследования* – поиск информации об утраченных и разрушенных в XX в. культовых сооружениях, располагавшихся на территории г. Рязани; выявление их местоположения; определение историко-архитектурного значения; разработка туристической карты-схемы, демонстрирующей градостроительную картину нахождения утраченных храмовых сооружений в городе; внесение предложений по устройству памятных мест (мемориальных досок).

**Методологической базой исследования** являются принципы историзма. Был использован метод ретроспективного анализа, основанный на аналитико-описательном и количественном подходах. Составлялись схемы.

**Основная часть.** Рязань – древний город. На современном месте находится уже более восьмисот лет. За этот период на его территории было возведено множество храмов, каждый из которых являлся памятником архитектуры, олицетворяющим ту или иную ушедшую эпоху.

Однако, несмотря на то что история храмового зодчества на территории Рязани исчисляется несколькими столетиями (XII–XX вв.), наиболее активное строительство храмов приходится на период XIX в. Так, в 1799 г. и в 1816-м г. в Рязани насчитывалось 15 церквей, в 1843 г. – 26, в 1847 г. – 27, к 1917 г. их число составило 35 (храмов – 18, домовых церквей – 13, иноверческих – 4), соборов – 3 и монастырей – 3 [11].

Культовые сооружения играли важную роль в застройке городов и располагались они не случайно. Согласно нормам «Строительного устава», устанавливать храмы следовало в центре площадей, а не посреди «обывательских строений» [12]. Значение церковной архитектуры в общей композиции города подчеркивалось размерами объемов, масштабностью масс и контрастом силуэтов доминант и городского фона рядовой застройки. Жилая застройка в дореволюционной Рязани была в один-два этажа, поэтому возводимые над низкими зданиями храмовые постройки, становились самыми высокими сооружениями города и производили грандиозное впечатление.

Ввиду того что большую часть населения составляли православные, основная масса церковных зданий старинной Рязани была представлена православными храмами. Однако полиэтнический состав населения города отразился на возведении культовых сооружений других конфессий. Так, на ул. Абрамовской (теперь Щедрина) действовали католический костел и лютеранская кирха, а на Право-Лыбедской улице – еврейская синагога.

После Октябрьской революции отношение новой власти к конфессиональной архитектуре изменилось коренным образом и было направлено на уничтожение культового зодчества. В Рязани разрушение церковных памятников проходило поэтапно.

В первое десятилетие после 1917 г. убирались колокола, кресты, разрушались верхние ярусы колоколен. Храмовые помещения перепрофилировались для различных функций, далеких от религиозных: переоборудывались под склады, клубы, мастер-

ские. В середине XX в. происходило планомерное уничтожение сакральной архитектуры.

В эти годы были полностью разрушены и снесены церкви: Александро-Невская (при ремесленном училище Живаго, 1878 г.), Александро-Невская (при Губернской земской больнице, 1822 г.), Архангельская (при арестантских ротах), Введенская (строилась между 1794-1798 гг., на пл. Мичурина), Владимирская (1693-1695 гг., ул. Семинарская), Воскресенская (при Дашковской богадельне, ул. Затинная), Воскресенская (именуемая также «Воскресение Звонное» и «Воскресения Господня», 1683 г., на пл. Свободы), Лазаревская (1825 г., возле Лазаревского кладбища), Николаевская (1868 г., при 1-й мужской гимназии, теперь – Художественный музей), Симеоновская (Симеона-Столпника, 1699-1700 гг., напротив Кремлевского вала), Серафимовская (при Доме трудолюбия, ул. Семинарская), Покровская (при Епархиальном женском училище), Покровская (при тюремном замке), Полковая (угол ул. Астраханской и Свободы), Троицкая (рядом с Муниципальным культурным центром), Троицкая (при мужском духовном училище) [3].

В результате была утрачена величественность, присущая городу, когда в нем имелось множество церквей, соборов, часовен и колоколен. Невосполнимые потери оправдывались необходимостью возведения новых зданий или благоустройства территорий.

К примеру, на месте разрушенной Троицкой церкви возвели Дворец профсоюзов (теперь – Муниципальный культурный центр). Там, где была Святая часовня в честь Государя Александра I, находившаяся на бывшей Ямской заставе, при благоустройстве территории расположился фонтан, завершивший архитектурное обрамление Театральной площади.

Введенская церковь в бывшей Стрелецкой слободе, существовавшая с 1796 г., в 1960-е гг. была полностью разрушена. На месте возникшего пустыря была устроена площадь академика И.П. Павлова, позже переименованная в честь русского селекционера И.В. Мичурина.

Сегодня в связи с радикальными изменениями, произошедшими в социально-экономической, политической и культурной сфере, церковное зодчество переживает новый период своего развития.

Начиная с 1991 г. восстановлены Преображенская церковь в пос. Канищево, Входеоерусалимская церковь на ул. Скоморошинской, Благовещенская церковь и Казанский собор Казанского Явленского женского монастыря на Затинной улице, Вознесенская церковь на одноименной улице, Николо-Ямская на ул. Циолковского.

Здесь следует отметить, что речь идет не просто о зданиях, а именно о памятниках архитектуры. В настоящее время на территории города Рязани находится 4 монастыря и 40 храмов [13]. Из них 30 сооружений являются объектами культурного наследия (ОКН): 21 – ОКН федерального значения; 9 – регионального [14].

Необходимо добавить, что древний центр Рязани – достопримечательное место «Древний город Переяславль-Рязанский» – признан объектом культурного наследия федерального значения. Он сохранил историческую среду и свой неповторимый архитектурный облик, поэтому Рязань представляет интерес для туристов и гостей города. Вследствие этого необходимо восстановить утраченные элементы городского ландшафта.

#### **Храмы, разрушенные до основания.**

**Введенская церковь.** Введенская церковь (рис. 1,а) находилась в б. Стрелецкой слободе (в настоящее время пл. Мичурина), в центре перекрёстка Введенской и Курганской (Маяковской) улиц. Изначально (в 1643 г.) была возведена деревянная церковь, а каменная, выдержанная в строгих формах классицизма [15], построена в 1796 г. Колокольню соорудили в 1865 г. Свой окончательный вид Введенская церковь приобрела в 1874 г., и он был неизменным вплоть до 1917 г. После Октябрьской революции Введенский храм лишился главков, колокольни и всего внутреннего убранства. В 1960-х гг. здание церкви было полностью снесено.

Значимость церкви заключалась в своеобразном линейно-градостроительном соотношении с храмом Вознесения Господня (восстановлен) – схожие по внешнему виду храмы были расположены напротив друг друга [10].

Восстановление церкви невозможно ввиду отсутствия свободной площадки для строительства. На месте бывшего храма реально установить мемориальную доску.

**Владимирская (Семинарская) церковь.** Каменная Владимирская (Семинарская) церковь (рис. 1,б) с одной главкой выстроена зодчим Я. Бухвостовым в 1693-95 гг. на улице Семинарской на месте раннего деревянного храма в честь Владимирской иконы Божией Матери, упоминавшегося в описи 1598 г. В 1753 г. рядом с храмом была возведена отдельно стоящая колокольня, завершившая церковный ансамбль.

Данный храм представлял интерес для русской архитектуры XVII в. с точки зрения композиционного новшества. Храм в своем объеме повторял форму латинского креста, в декоре и стиле здание соединяло традиции древнерусского стиля (кокошники в завершении стен) с веянием нового стилистического направления того времени – барокко (колончатые наличники с разорванными фронтонами) [15, с. 161-162].

В 1936 г. храмовое сооружение было разрушено и утрачено для Рязани.

Возрождение церкви неосуществимо за неимением свободного участка для строительства. Рядом с вновь выстроенным новым храмом возможна установка мемориальной доски.



Рис. 1. Утраченные храмы:

а – Введенская церковь; б – Владимирская (Семинарская) церковь

**Церковь Воскресения Господня.** Первые упоминания о Воскресенской церкви относятся к 1550 г. В 1618 г. она была сожжена. Устройство каменного храма относится к 1683 г., который после пожара 1710 г. был восстановлен. Находился в центре современной пл. Свободы на перекрестке улиц Владимирской и Грибоедова (б. Горшечной и Старогоршечной) (рис. 2,а). Его построение приписывают зодчему Якову Бухвостову.

Храм типа «восьмерик на четверике» завершался восьмигранным световым барабаном и венчался маленькой главкой с яблоком и крестом [15, с. 159]. Особенности храма являлись симметрия, многоярусность и множество декоративных элементов.

В 1950 г. разрушили трехъярусную колокольню, в 1954 г. снесли и сам храм, чтобы не мешал троллейбусному движению. Позже на этом месте установили большие цветочные часы, в 1967 г. их демонтировали и возвели стелу, посвященную 50-летию Октябрьской революции.

Церковь являлась важнейшим элементом в системе городских пространств, придавая площади определенную градостроительную атмосферу. На церковь Воскресения Сгонного ориентировались улицы Старогоршечная (Грибоедова) и Владимирская (Свободы).

Предлагается на месте разрушенной церкви установить макет разрушенного храма и мемориальную доску.

**Лазаревская церковь.** Первоначальный Лазаревский храм был деревянным, датируется 1796 г. Со временем церковь пришла в негодность, и в ней стало невоз-

можно совершать службы. В 1817 г. в 25 саженях<sup>1</sup> от старого места приступили к сооружению новой каменной церкви (рис. 2, б).

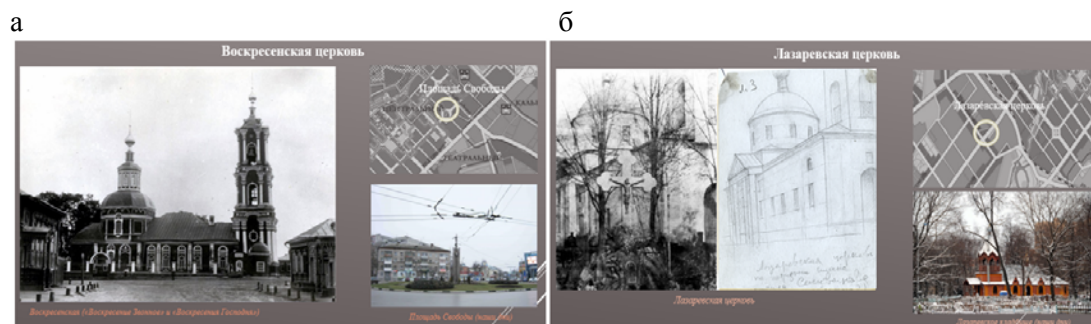


Рис. 2. Утраченные храмы:  
а – Церковь Воскресения Господня; б – Лазаревская церковь

«Рязанские Епархиальные ведомости» за 1892 г. сохранили описание Лазаревской кладбищенской церкви: «...имеет форму удлиненного прямоугольника с алтарным полукружием и с двумя папертиями – с южной и с северной сторон, на церкви одна глава. Длина церкви 17, а ширина 5 саженей. Колокольня построена одновременно с нею. Высота ее – около 8 саженей» [9].

В марте 1939 г. было принято решение о закрытии храма. Он долго пустовал, но впоследствии был разобран. Из кирпича разрушенного храма построили кинотеатр «Родина». На Лазаревском кладбище имеются захоронения участников войны 1812 г., скончавшихся в рязанских госпиталях.

На месте поруганной святыни возвели временную деревянную церковь во имя святого праведного Лазаря. Однако в результате археологических раскопок был обнаружен фундамент старого здания, поэтому предполагается, что восстановление храма в его историческом виде возможно.

**Симеоновская (Симеона Столпника) церковь.** Каменная, белоснежная, с красными наличниками, с одной главою и колокольней церковь Симеона Столпника была воздвигнута в 1698 г. в Симеоновском монастыре (рис. 3, а). Располагалась напротив кремлёвского земляного вала. Сюда сходились древние дороги из Москвы, Владимира, Астрахани. В 1500-х гг. это место именовалось «Конская площадь». Здесь, между Симеоновской и Входаиерусалимской церквями, исстари собирались торжища [16].

Симеоновский храм был закрыт 18 ноября 1924 г. Сначала он использовался как хлебный склад, позже был полностью разрушен. В настоящее время на его месте устроен сквер 26 Бакинских комиссаров.



Рис. 3. Утраченные храмы:  
а – Симеоновская церковь; б – Троицкий храм

**Троицкая (Александро-Невская) церковь.** В Рязанском пригороде, в Троицкой слободе в 1879 г. было решено возвести храм. История постройки храма необычна. Второго апреля 1879 г. на императора Александра II было совершено покушение, но

<sup>1</sup> Сажень – старорусская единица измерения, равная 2,16 м и содержащая 3 аршина.



он чудом остался жив. В честь этого события были построены десятки храмов по всей стране. Одним из них стал Троицкий храм в Рязани (рис. 3, б).

Выдержанный в русско-византийском стиле храм первоначально венчался пятью некрупными луковичными главками. В конце XIX в. в ходе перестройки церкви вместо пятиглавия появился крупный барабан, увенчанный большой главкой [15, с. 432]. Массивный купол собора хорошо просматривался с Ново-Базарной (теперь пл. Ленина) площади, устанавливая визуальные связи между разными частями города.

В документах 1923 г. Троицкий храм описывался так: «Церковь каменная, с таковою же колокольней с 11 колоколами на ней <...> имеет над собой купол каменный с железным крестом. Окон в нем 18. Церковь обнесена каменной оградой» [17].

В 1920-е гг. в храме был устроен клуб железнодорожников, а в 1960-е гг. здание было уничтожено.

Восстановление храма невозможно ввиду отсутствия свободной для строительства площадки. Предлагается около здания Муниципального культурного центра установить мемориальную доску.

### Храмы, разрушенные частично.

**Ильинская церковь.** Первоначальная Ильинская церковь (датируется 1638 г.), располагалась возле Спасского монастыря [18]. Каменная Ильинская церковь с центральной и угловыми главками-свечками возведена в 1698-99 гг. известным зодчим Я. Бухвостовым.

В 1806 г. церковь была значительно расширена, вместо одного в ней было устроено два престола: в честь Иоанна Богослова и первомученика архиерея Стефана; к тому же времени относится и построение колокольни (рис. 4, а).

В годы советской власти колокольня храма была разрушена, богослужения прекращены. В 1980-е гг. церковь была изменена до неузнаваемости. С 1953 г. здание использовалось как лекторий. В 1990-х гг. в храме планировалось разместить городской ЗАГС.

Решением Рязоблисполкома от 27.08.71 г. № 250 Ильинский храм признан объектом культурного наследия регионального значения.

В настоящее время церковь Ильи Пророка передана Рязанской Епархии. Выполнен комплекс ремонтно-восстановительных работ.

**Николовысоковская (Николы Долгошея) церковь** – одна из древнейших в Рязани. Церковь возведена при Иване Грозном в 1566 г. До неё на этом месте стояла церковь Вознесения Господня. В XVII в. к церкви была пристроена несоразмерно крупная апсида. В 1761 г. возвели колокольню (рис. 4, б).



Рис. 4. Храмы, разрушенные частично:  
а – Ильинская церковь; б – Николовысоковская церковь

В народе церковь именовалась как Николы «Долгошея». Такое прозвище храм получил ввиду того, что имел необычную столпообразную композицию: восьмигранный шатровый купол, поставленный на многогранное (*форма плана не имеет прямых аналогий.* – Прим.) основание без обычного восьмерика, возвышался над колокольней [15, с. 18].

Существует мнение, что подобными храмами отмечены города, через которые прошло войско Ивана Грозного в походе на Казань. Похожие культовые сооружения имеются в Москве, Коломне, Муроме и Нижнем Новгороде [10].

После Октябрьской революции 1917 г. храм еще некоторое время был открыт для верующих. Его закрыли в 1929 г., церковное имущество и иконы были реквизированы, а главы с православными крестами разрушены. Здание храма перепрофилировали под нужды деревообрабатывающего завода. В 1965 г. на базе деревообрабатывающего завода был открыт Рязанский приборный завод.

В настоящее время частично разрушенный уникальный храм (сохранился фрагмент колокольни) находится на закрытой территории Рязанского приборного завода и используется в качестве подсобного помещения.

**Николо-Дворянская церковь.** Эта церковь одна из старейших в городе. Каменный храм с главным престолом во имя святителя Николая Чудотворца построен в 1767 г. на месте деревянной Никольской церкви, упоминаемой в 1676 г. [2, с. 39]. В 1805 г. выстроили 3-ярусную колокольню в стиле классицизма. Колокольню с кубическими верхними ярусами венчал тонкий короткий шпиль на высоком постаменте (рис. 5).

Основной объем – массивный двухсветный куб (завершение не сохранилось). Фасады храма, разделенные на три прясла пилястрами, сохраняют след большого промежуточного карниза. С восточной стороны примыкает апсида, представляющая собой пятигранный объем, каждая грань которого декорирована спаренными пилястрами, разделяющими апсиду на равные части.

В 1917 г. была разрушена колокольня, полностью уничтожено внутреннее убранство церкви. В 1920-е гг. было пристроено Г-образное крыло.

В советские годы здание церкви передали под учебный пункт автотранспортного техникума. В настоящее время возвращено Рязанской епархии, и в нем вновь возобновлены богослужения.

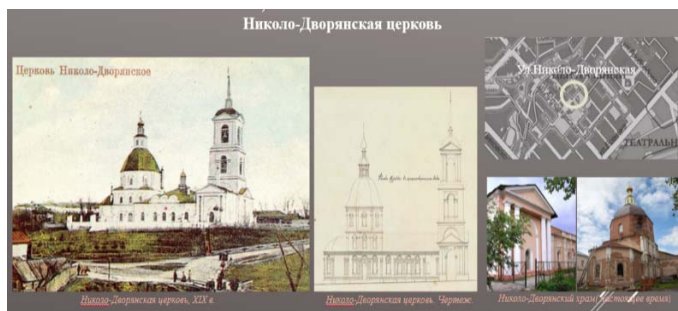


Рис. 5. Храмы, разрушенные частично: Николо-Дворянская церковь

Храм имел большое градостроительное значение, выделялся благодаря удачному расположению на крутом берегу речки Лыбедь. До разрушения верхних объемов храма и колокольни строгий силуэт Николо-Дворянской церкви возвышался на одноименной улочке над окружавшей его одноэтажной деревянной застройкой городского пространства и замыкал перспективу Право-Лыбедской улицы.

Несмотря на утраты, церковь сохранила первоначальные черты нарышкинской архитектуры в сочетании с классицистическим основанием колокольни. Сохранились входная группа, трапезная, обезглавленный храм, некоторые элементы декора.

В соответствии с Постановлением СМ РСФСР от 04.12.1974 г. № 624, церковь является объектом культурного наследия федерального значения.

**Заключение.** Установка памятных знаков в ознаменование утраченных храмов – это путь к возрождению материального и нематериального культурного наследия, постижению исторической ценности памятников старины, каждый из которых был неповторимым.



Восстановление и реставрация сохранившихся строений направлены на приумножение национального историко-культурного богатства Рязанского края.

Продвижение религиозного туризма (рис. 6) может способствовать расширению туристического пространства, изменению имиджа города в положительную сторону и привлечению инвестиций для восстановления памятников архитектуры и увеличению городского бюджета. Систематизированный авторами материал и выводы могут стать фундаментом для дальнейшего социально-культурного развития города.

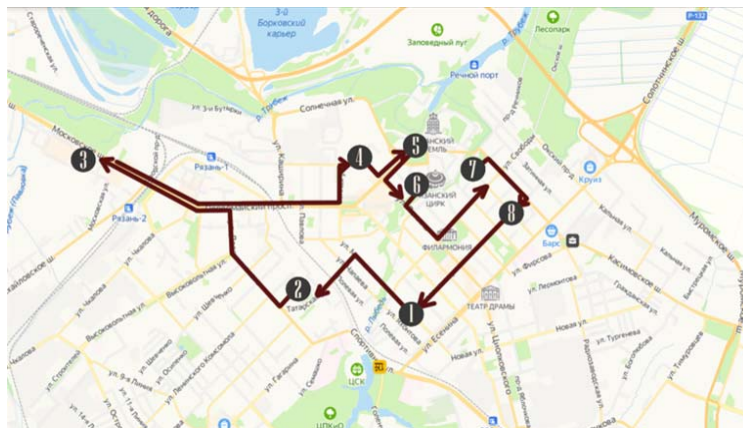


Рис. 6. Схема предлагаемого туристического маршрута

**Выводы.** В ходе исследования на основе собранных историко-архитектурных материалов выявлены утраченные и частично разрушенные храмы, проанализирована возможность их воссоздания. Внесены предложения по установке памятных мемориальных досок.

#### Список литературы

1. Еремеев, С.Н. Пространственные акценты в городской среде Николаевска в XIX-XX вв.: к вопросу об утраченных храмах / С.Н. Еремеев // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2017). Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 25-27 октября 2017 года. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – С. 152–161.
2. Добролюбов, И.В. Историко-статистическое описание церквей и монастырей Рязанской епархии, ныне существующих и упраздненных со списками их настоятелей за XVII, XVIII и XIX столетиями и библиографическими указаниями / И.В. Добролюбов. – Зарайск : Типография А. Н. Титовой, 1884 г. – Т. 1.
3. Аграмаков, Н.Н. Камень веры. Церкви рязанские: Рязань и губерния в исторических документах, очерках, версиях, рассказах, фотографиях / Н.Н. Аграмаков // Вечерняя Рязань. – 1996. – № 15. – С. 21.
4. Аграмаков, Н.Н. Церкви и монастыри в Рязани: исторический путеводитель / Н.Н. Аграмаков. – Рязань : ТСРК «Губернская Рязань», 2008. – 280 с.
5. Вагнер, Г.К. Рязань / Г.К. Вагнер. – Москва : Искусство, 1971.
6. Вагнер, Г.К. Рязанские достопамятности / Г.К. Вагнер, С.В. Чугунов. – Москва : Искусство, 1989. – 167 с.
7. Орлова, Ю.В. Лазаревская церковь Рязани как памятник воинам 1812 года / Ю.В. Орлова // Рязанский богословский вестник – №1(4) (2011). – С. 113-119.
8. Орлова, Ю.В. Рязанские реалии в «воспоминаниях» Я.П. Полонского: Лазаревская церковь (педагогический аспект) / Ю.В. Орлова // Я.П. Полонский: личность, творчество, эпоха : сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции (посвящается 200-летию со дня рождения поэта). – 2019. – С. 327–332.

9. Синельникова, Т.П. Лазаревская кладбищенская церковь / Т.П. Синельникова. – URL: <https://62info.ru/history/node/5189> (дата обращения: 03.01.2025).
10. Александров, Е. Разрушенное прошлое Рязани / Е. Александров – URL: <https://62info.ru/history/node/350> (дата обращения: 03.01.2025).
11. Государственный архив Рязанской области (ГАРО). Ф. 5. Оп. 2. д. 5, л. 1, д. 179, л.16-17, д. 410, л. 42 об.- 43; Ф. 19. Оп. 1. Д. 1623. Л. 41.
12. Строительный устав // Свод Законов Российской империи. 1900. Т. XII, ч. 1. (изд. неофициальное) / под ред. И.Д. Мордухай-Болтовского. – Санкт-Петербург, 1912. – ст. 104.
13. Официальный сайт Рязанской Епархии. – URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram> (дата обращения: 03.01.2025).
14. Официальный сайт правительства Рязанской области. – URL: <https://iokn-old.ryazan.gov.ru/activities/spisok-okn/> (дата обращения: 03.01.2025).
15. Свод памятников истории и культуры России. Рязанская область : в 4 ч. Ч. 1. / Отв. ред. В.И. Колесникова. – Москва : Индрик, 2012. – 880 с.
16. Клировые ведомости 1913 города Рязани. – URL: <https://forum.vgd.ru/4228/110324/> (дата обращения: 22.03.2022).
17. Троицкий храм в Рязани. Памятник Государю Александру II. – URL: <https://tverdyi-znak.livejournal.com/1498912.html> (дата обращения: 22.03.2022).
18. Негрешева, И.А. История возрождения: Ильинская церковь на Соборной площади в г. Рязани / И.А. Негрешева // Наука, образование и экспериментальное проектирование : тезисы докладов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. – Т. 2. – Москва : МАРХИ, 2023. – С. 102–103.

## References

1. Ereemeev, S.N. Spatial accents in the urban environment of Nikolaevsk in the XIX-XX centuries: on the issue of lost temples / S.N. Ereemeev // Youth, science, technology: new ideas and prospects (MNT-2017). Selected reports of the IV International Scientific Conference of Students and Young Scientists, Tomsk, October 25-27, 2017. – Tomsk : Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2017. – P. 152–161.
2. Dobrolyubov, I.V. Historical and statistical description of the churches and monasteries of the Ryazan diocese, now existing and abolished with lists of their abbots for the XVII, XVIII and XIX centuries and bibliographic instructions / I.V. Dobrolyubov. – Zaraysk : A. N. Titova Printing House, 1884. – Vol. 1.
3. Agramakov, N.N. The Stone of Faith. Ryazan Churches: Ryazan and the province in historical documents, essays, versions, stories, photographs / N.N. Agramakov // Vechernyaya Ryazan. – 1996. – No. 15. – P. 21.
4. Agramakov, N.N. Churches and monasteries in Ryazan : a historical guide / N.N. Agramakov. – Ryazan : TSRK Gubernskaya Ryazan, 2008. – 280 p.
5. Wagner, G.K. Ryazan / G.K. Wagner. – Moscow : Art, 1971.
6. Wagner, G.K. Ryazan memorabilia / G.K. Wagner, S.V. Chugunov. – Moscow : Art, 1989. – 167 p.
7. Orlova, Yu.V. Lazarevskaya Church of Ryazan as a monument to the soldiers of 1812 / Yu.V. Orlova // Ryazan Theological Bulletin – 2011. – №1(4). – P. 113–119.
8. Orlova, Yu.V. Ryazan realities in the «memoirs» of J.P. Polonsky: Lazarevskaya Church (pedagogical aspect) / Yu.V. Orlova // J. P. Polonsky: personality, creativity, epoch : Collection of articles based on the materials of the II International Scientific and Practical Conference (dedicated to the 200th anniversary of the poet's birth). – 2019. – P. 327–332.
9. Sinelnikova, T.P. Lazarevskaya cemetery church / T.P. Sinelnikova. – URL: <https://62info.ru/history/node/5189> (date of request: 03.01.2025).
10. Alexandrov, E. The destroyed past of Ryazan / E. Alexandrov. – URL: <https://62info.ru/history/node/350> (date of request: 03.01.2025).

11. The State Archive of the Ryazan region (GARO). F. 5. Op. 2. d. 5, l. 1, d. 179, l. 16-17, d. 410, l. 42 vol. 43; F. 19. Op. 1. D. 1623. l. 41.
12. Building regulations // The Code of Laws of the Russian Empire. 1900. Vol. XII, part 1. (unofficial edition) / edited by I.D. Mordukhai-Boltovsky. – St. Petersburg, 1912, art. 104.
13. The official website of the Ryazan Diocese. – URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram> (date of request: 03.01.2025).
14. Official website of the Government of Ryazan region. – URL: <https://iokn-old.ryazan.gov.ru/activities/spisok-okn/> (date of access: 03.01.2025).
15. The collection of historical and cultural monuments of Russia. Ryazan region: At 4 p. P. 1. / Ed. by V.I. Kolesnikov. – Moscow : Indrik, 2012. – 880 p.
16. Clear sheets of 1913 of the city of Ryazan. – URL: <https://forum.vgd.ru/4228/110324/> (date of access: 03/22/2022).
17. Trinity Church in Ryazan. Monument to Tsar Alexander II. – URL: <https://tverdyi-znak.livejournal.com/1498912.html> (date of request: 03/22/2022).
18. Negresheva, I.A. History of the Renaissance: St. Elijah's Church on Cathedral Square in Ryazan / I.A. Negresheva // Science, education and experimental design: Abstracts of the international scientific and practical conference of faculty, young scientists and students. – Vol. 2. – Moscow : MARKHI, 2023. – P. 102–103.

*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

**Петрянина Любовь Николаевна,**  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Дерина Мария Александровна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Усова Анастасия Алексеевна,**  
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

**Petryanina Lyubov Nikolaevna,**  
Associate Professor of the Department «Urban  
Construction and Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Derina Maria Aleksandrovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Urban Construction and  
Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

**Usova Anastasia Alekseevna,**  
Master's student  
E-mail: gsia@pguas.ru

## АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЁ НАПРАВЛЕНИЙ

А.Н. Петрянина, М.А. Дерина, А.А. Усова

Проводится анализ функционирования зданий современных общеобразовательных школ. Рассматриваются ключевые требования участников образовательного процесса к модернизации школьного здания, и на их основе определяются направления архитектурно-планировочной реорганизации. Устанавливаются причины сложной адаптации существующих школьных зданий к современному образовательному процессу, предлагаются варианты модернизации отдельных планировочных составляющих. Обосновывается наиболее актуальный вариант реконструкции школ, на основе которого определяются основные подходы к разработке его объемно-планировочных, конструктивных решений и преимущества применения. Делаются выводы о принципах модернизации школьных зданий с учетом изменяющихся технических и социальных условий.

*Ключевые слова: школьное здание, модернизация, архитектурно-планировочное решение, функциональный блок, дифференциация*

## ARCHITECTURAL AND PLANNING MODERNIZATION OF SCHOOL BUILDINGS AND DEFINITION OF ITS DIRECTIONS

L.N. Petryanina, M.A. Derina, A.A. Usova

The analysis of functioning modern secondary schools buildings is carried out. The key requirements of the participants of the educational process for the modernization of a school building are considered, and based on them, the directions of architectural and planning reorganization are determined. The reasons of difficult adaptation of the existing school buildings to the modern educational process are established, and options for modernizing individual planning components are proposed. The most relevant option for the reconstruction of schools is substantiated, on the basis of which the main approaches to the development of its spatial planning, constructive solutions and the advantages of its application are determined. Conclusions are drawn about the principles of modernization of school buildings, taking into account changing technical and social conditions.

*Keywords: school building, modernization, architectural and planning solution, functional block, differentiation*

Школьное образование претерпевает реформы на протяжении последних десятилетий. Появление новых типов образовательных учреждений, таких, как лицеи, гимназии и частные школы, а также внедрение углубленного изучения отдельных предметов в обычных школах свидетельствует о значительных изменениях в образовательном процессе и массовой реорганизации. В образовательной практике появляются новые методы, а школы обновляют учебные программы, вводя новые дисциплины. Однако инновационный учебный процесс осуществляется в типовых зданиях, унаследованных от предыдущей социальной системы, что создает несоответствие между учебным процессом и его материальной основой. В связи с этим возникла необходимость пересмотреть существующие подходы к проектированию школьных зданий, их функциональному наполнению и планировочной организации.

Существующий опыт по проектированию образовательных учреждений среднего звена нового типа имеет немало положительных примеров. В течение прошлого века изменялись количественные параметры школьных зданий, сейчас мы вступили в период качественных преобразований. Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие школьные здания не соответствуют образовательному процессу, который в них осуществляется. Часто новые, дорогостоящие проекты оказываются неэффективными, т.к. они разрабатывались с учетом требований устаревшей социальной системы.

Целью проведенных исследований являются анализ функционирования современной общеобразовательной школы, выявление ключевых требований участников образовательного процесса к модернизации школьного здания и определение направлений его архитектурно-планировочной реорганизации на этой основе.

В соответствии с поставленной целью основные задачи исследования включают:

- анализ динамики изменений в архитектурно-планировочной реорганизации школьного здания в контексте развития образовательной деятельности;
- определение особенностей архитектурно-планировочной реорганизации школьного здания на современном этапе общественного развития.

Методология исследования предполагает последовательный переход от теоретического анализа развития учебного процесса и соответствующей архитектурно-планировочной организации школьного здания к изучению его функционирования, что в свою очередь позволяет определить его реорганизацию на современном этапе.

Согласно выполненному анализу существующих объектов, определено, что восстановление старого школьного здания – более дешевый и экологичный вариант, чем возведение нового. Для преобразования существующих школьных пространств были выделены самые проблемные зоны для первоочередной переработки: увеличение вместимости школы с устройством минимальных пристроек или без них, пустые рекреации, нецелесообразно длинные коридоры и морально устаревшая школьная библиотека.

Сложность адаптации существующих зданий образовательных организаций состоит в следующем:

- из-за значительной разницы в требованиях пожарной и санитарной безопасности для школы были полностью пересмотрены подходы к функциональной схеме, т.к. такие проекты проверяются более тщательно;
- вход в школу не отвечает современным стандартам практически в каждом рассмотренном проекте – зона слишком узкая, и родители, встречающие детей, почти сразу сталкиваются с турникетами; поэтому в проектах модернизации это пространство расширяется перемещением турникетов дальше от входа, делая его более удобным (рис. 1, 2);
- холл первого этажа, как одно из самых функционально используемых и нагруженных пространств, часто имеющих недостаточную площадь из-за временных перегородок, сооружаемых в разные периоды эксплуатации, был объемно увеличен,

что положительно влияет на естественное освещение; в случаях, когда образовательное учреждение располагается в зданиях, имеющих историческую ценность, значительный по высоте холл первого этажа, дробится дополнительными объемами (возможно устройство деревянного решетчатого каркаса) (рис. 2);

- школьные коридоры – темные, длинные, однообразные – минимизированы или заменены другими пространствами с нишами для отдыха и возможностью трансформации в зону для проведения мероприятий; недостаток естественного света дополнен регулируемым искусственным освещением, т.к. транзитные пространства во время уроков используют не в полном объеме, или устройством окон и остекленных дверей между классами и коридором; однообразие длинных коридоров преобразовано с использованием цветового зонирования: часть обрамляющих поверхностей (стены, пол) окрашены в яркие цвета, добавлены грифельные и маркерные поверхности или тематические рисунки, решения зависят от размеров и формы пространства, т.к. по противопожарным нормам пути эвакуации должны быть свободны (рис. 3);

- рекреации для активной деятельности, тихих занятий, общения, самоподготовки, уединения имеют различные варианты решения: уединенная зона в тупиках или местах с низкой проходимостью, шумная зона с возможностью крепления спортивного инвентаря к стенам, зона самоподготовки с трансформацией мебели (рис. 4);

- оформление стен: в типовых школьных зданиях предлагается использовать цветовую навигацию, когда каждому этажу или одинаковому лестничному блоку присвоен свой цвет и графические навигационные обозначения, позволяющие ориентироваться в школьном пространстве; под такой интерфейс подбирались и наполнение пространства (рис. 5);

- создание дополнительных площадей для учебных классов и небольших помещений для переговорных и индивидуальных занятий может быть достигнуто зонированием рекреаций с устройством мобильных или стационарных перегородок из стекла, ГКЛ, ЛДСП и т.п., однако требуемую звукоизоляцию обеспечивают только стационарные ограждения, а также использование для отделки стен, пола и потолка акустических материалов;

- преобразование школьных библиотек в востребованное пространство, которое выполняет функции класса, лектория, а в некоторых случаях кинотеатра, где функциональные зоны возможно располагать вдоль окон; целесообразное использование читального зала как коворкинга (рис. 6).

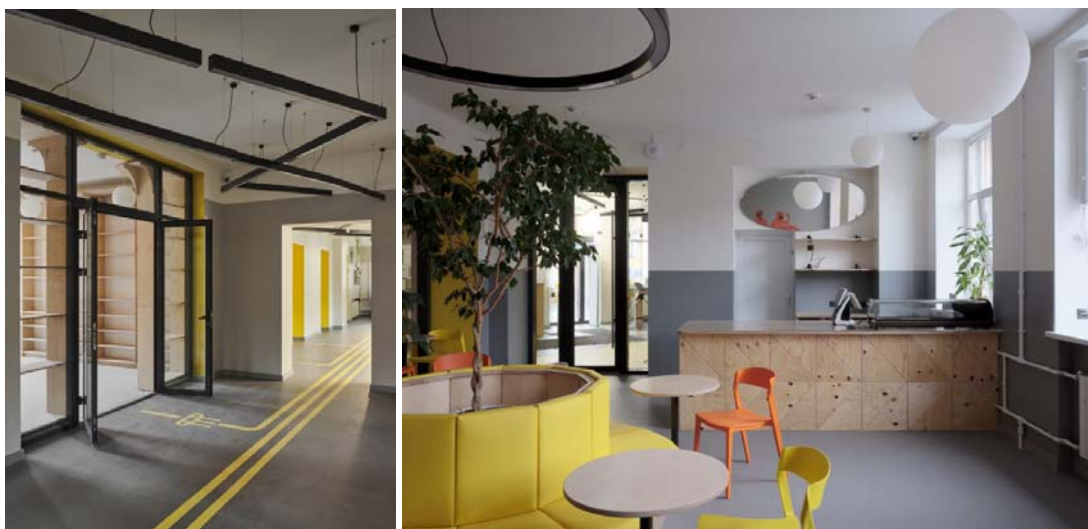


Рис. 1. Проектные решения по модернизации входных групп школьных зданий





Рис. 2. Варианты проектных решений модернизации школьных холлов первого этажа



Рис. 3. Проектные решения по модернизации школьных коридоров



Рис. 4. Варианты проектных решений по модернизации школьных рекреаций

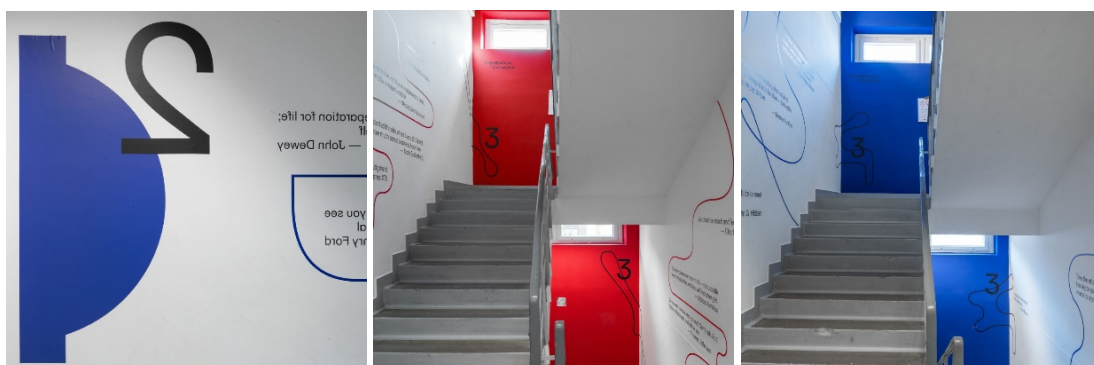


Рис. 5. Проектные решения по цветовой навигации в школьных зданиях



Рис. 6. Проектные предложения по модернизации школьных библиотек

Однако было определено, что далеко не всегда при предполагаемой модернизации зданий образовательных учреждений в пределах существующих конструкций удастся достичь результата современного уровня. Поэтому актуален вариант реконструкции с пристройкой дополнительных блоков.

Пристройки к действующим зданиям школ – сложные многофункциональные комплексы помещений с разнообразной средой, обычно присоединяемые к основному зданию школы и предназначенные для учебных и общешкольных целей. Назначение пристраиваемых для расширения блоков различно: учебные, универсальные, мастерские, актовый и (или) спортивный залы, столовые и т.д. Предлагаемые функциональные блоки для пристроек представлены на рис. 7.

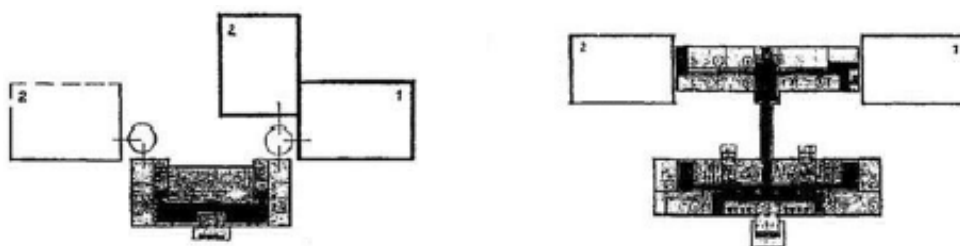


Рис. 7. Предлагаемые функциональные схемы блоков-пристроек к образовательным учреждениям

Блоки-пристройки – один из целесообразных вариантов в контексте активной реконструкции морально устаревших школьных зданий, что связано не только с их износом, но и с новыми требованиями к учебному и воспитательному процессу. Данный вид реконструкции возможен для массового и индивидуального применения. В процессе исследования были рассмотрены результаты открытых архитектурных конкурсов на реконструкцию школьных зданий, которые показали актуальность темы пристроек, как одного из ключевых аспектов модернизации в условиях плотной городской застройки. На основе варианта пристроек развивается также модульная система для школ (рис. 8).





Рис. 8. Пример пристройки к зданию школы блока учебных классов

Было установлено, что требования к пристройкам в виде блоков определены сферой их применения, т.к. они отличны от тех, которые предъявляются к отдельно стоящим объектам. Пристраиваемый блок и основное здание школы образуют единый функциональный комплекс – объемно-планировочные решения и архитектурно-художественное оформление; поэтому вопросы примыкания дополнительного блока к школьному зданию и его размещения на участке решались комплексно: с учетом расположения, формы и размеров основного здания, целесообразности в пристройке блока, а также этажности и принципа окружающей застройки.

Выполненные исследования в области проектирования пристроек к существующим зданиям общеобразовательных учреждений дали возможность определить подходы к разработке современных объемно-планировочных, конструктивных и архитектурных решений, основными из которых стали:

- определение типов пристроек, наиболее востребованных для модернизации существующих типовых школьных зданий;
- разработка объемно-планировочных решений пристроек блочного типа, применяемых для модернизации школьных зданий;
- функциональная взаимосвязь между группами существующих и пристраиваемых помещений школы в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами;
- рациональное и экономическое обоснование архитектурных, объемно-планировочных, конструктивных и инженерных решений;
- технологичность примыкания пристроек к существующему школьному зданию с учетом объемно-планировочных особенностей, соответствия требованиям по освещенности и инсоляции помещений, градостроительным нормам размещения образовательных учреждений, форме и площади школьного участка.

Основным преимуществом выполнения реконструкции в виде пристроек является обеспечение возможности многократного применения разработанных проектных решений. Однако нередко индивидуальные решения для реконструкции существующего здания школы, когда на ее базе предполагается организовать специальное образовательное учреждение, а также для условий стесненной городской застройки на небольших по площади участках, сложной формы или рельефа. Индивидуальное решение возможно и для экспериментальных разработок.

В большинстве рассмотренных случаев целью реконструкции было приведение школьных зданий в соответствие с современными нормами. Поэтому был определен оптимальный набор помещений, обеспечивающий возможность пристройки к различным зданиям школ подобного типа (рис. 9).

Набор запроектированных помещений в пристройках может дополнить недостающие площади в существующих школьных зданиях, когда тип образовательного учреждения и его планировка не изменяются, а также при формировании нового типа образовательного учреждения в существующем здании с изменением его планировки.

Так как при реконструкции зданий образовательных учреждений чаще всего требуются дополнительные площади учебного и общешкольного назначения, то в соответствии с этим была принята дифференциация пристроек по двум вышеуказанным группам. При необходимости к существующим школьным зданиям возможно пристроить блоки одновременно двух групп.



Рис. 9. Пример пристройки универсального типа к существующему зданию школы

Далее пристройки были классифицированы по:

- возрастному признаку – начальная школа, средние и старшие классы;
- функциональному назначению;
- наличию спортивного и актового залов и административных помещений.

Вариант пристройки для начальной школы оказался большего объема, чем просто начальные классы, т.к. в соответствии с требованиями включил в себя вестибюль с гардеробом, медицинские и административные помещения. Такой набор обеспечил универсальность его применения в составе средней общеобразовательной школы и экономичность решения в сравнении с отдельно стоящими объектами из-за отсутствия в их составе пищеблока, актового зала, библиотеки.

Вариант пристройки для средних и старших классов школ был предложен с различным функциональным набором помещений: учебные классы, специализированные учебные кабинеты, лаборатории, практикумы, мастерские и универсальные кабинеты.

В результате анализа и разработки пристроек были выделены типы производных от понятия «пристройка» (рис. 10). Выбор этих типов основывался на проектной задаче, учитывающей специфические условия модернизации и реконструкции школьного здания.

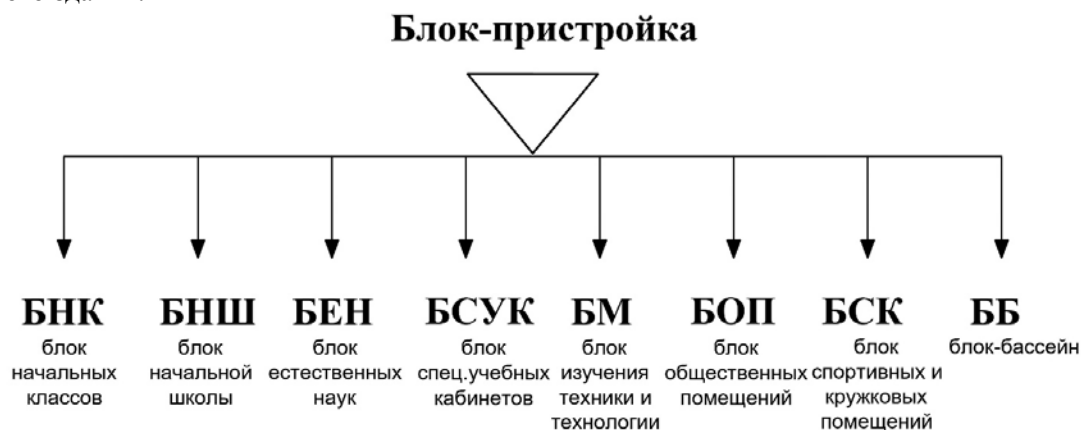


Рис. 10. Дифференциация понятия «пристройка»

Выделенные преимущества применения пристроек при реконструкции и модернизации существующих образовательных учреждений:

- «гибкость», благодаря которой достигаются значимые социально-экономические преимущества в сложившихся условиях застройки;
- возможность обеспечить существующее школьное здание необходимым набором функциональных пространств, позволяющим превратить школу в общественный и

культурный центр микрорайона в целом, что соответствует общественно-социальным концепциям и моделям образования.

На заключительном этапе изучения проблемы модернизации школьных зданий встал вопрос единства стиля существующего здания и пристроек, причина которого – сочетание основного здания с вновь пристраиваемым. Однако «гибкость» позволила пристройке гармонично сочетаться с основным зданием при использовании современных отделочных материалов и фасадных систем (рис. 11). При разработке проектов модернизации школ с использованием алгоритмов и программ, в зависимости от исходных параметров (климатические условия, экология, демография, расположение, социальный запрос, инсоляция и т.д.) автоматизированно подбирались оптимальные архитектурные решения для пристроек и проекта модернизации в целом, что сокращало затраты на реновацию школьного фонда в целом. При использовании архитектором алгоритмов возрастает эффективность архитектурно-планировочной модернизации школьных зданий, не исключая проблем, связанных с индивидуальными решениями в каждом конкретном случае.

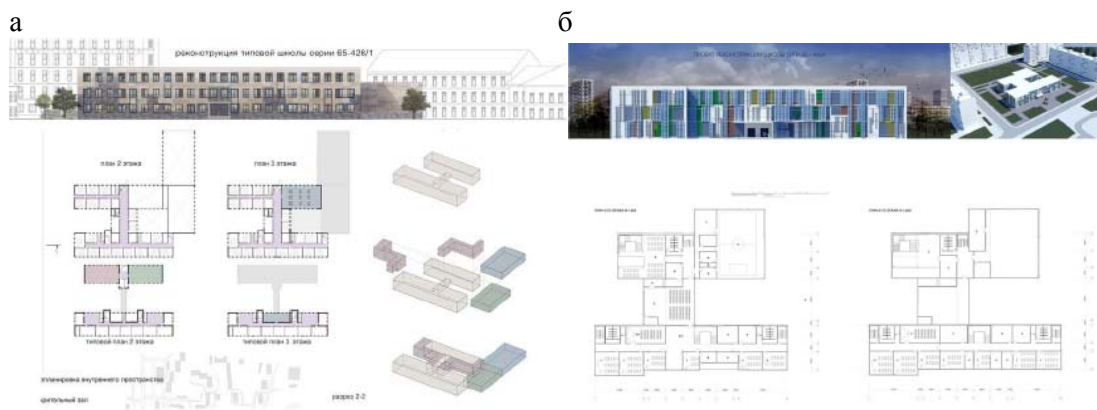


Рис. 11. Проектные решения реконструкции зданий образовательного назначения, построенных по типовым проектам

Современное развитие школьного образования пришло к тому, что школа – центр гражданского и идеологического развития личности, где в процесс досуга вовлекаются родители. Также школа может не только становиться раз в несколько лет избирательным участком, но и функционировать в качестве площадки, где могут проходить творческие, спортивные и семейные мероприятия, праздники и т.д. В этом случае пристройка к существующему школьному зданию приобретет не только важную архитектурно-планировочную, но и социально-общественную роль (рис.12).

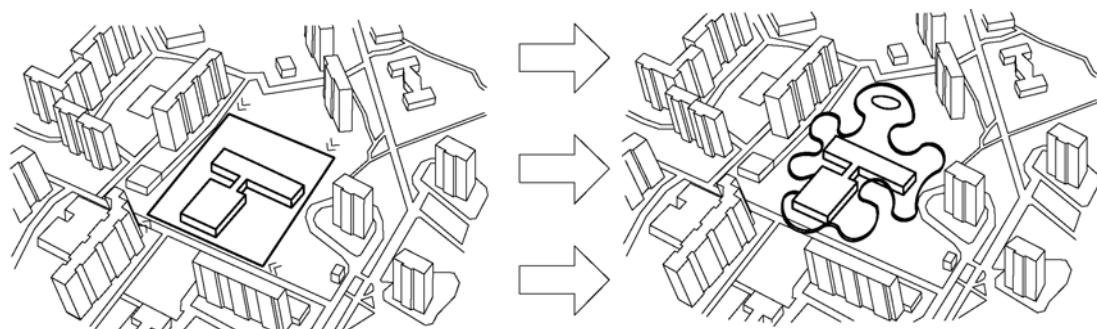


Рис. 12. Схема превращения школьного двора в пространство общего пользования микрорайона

#### Выводы:

1. Исследованы механизмы воздействия социальной системы на образовательный процесс, определена его специфика в условиях современного этапа общественного развития – информационного общества.

2. Выполнен анализ специфики взаимодействия всех участников учебного процесса в современных школьных зданиях, определены их требования к организации образовательной деятельности в этих учреждениях.

3. Смоделирован процесс трансформации школьного здания в контексте изменений в образовательной деятельности.

4. Разработаны принципы проектирования школ, учитывающие современные и изменяющиеся социальные условия, предложены примеры реконструкции существующего школьного фонда.

Предложенные принципы проектирования образовательных зданий для среднего звена могут служить рекомендациями для архитекторов и проектировщиков при создании новых объектов и модернизации существующих зданий, а также при разработке нормативных актов, касающихся проектирования таких образовательных учреждений.

### Список литературы

1. Гусев, А.Д. Инвестиционная привлекательность использования отходов резинотехнических изделий / А.Д. Гусев, М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Международный научный журнал. – 2020. – №6. – С.30–36.

2. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1. – С.75–79.

3. Коншина, Е.Е. О реализации программы по модернизации первичного звена российской системы здравоохранения / Е.Е. Коншина, Е.Ю. Огнева, Н.А. Савченко // Менеджмент качества в медицине. – 2021. – № 1. – С. 4–7.

4. Морозова, Ю.А. Цифровая трансформация российского здравоохранения как фактор развития отрасли / Ю.А. Морозова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2. – С. 36–47.

5. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.

6. Санина, Н.П. Аспекты программы модернизации первичного звена здравоохранения: проблемы и решения / Н.П. Санина, М.В. Кравцова // Экономика и управление. – 2021. – Т. 27, № 6 (188). – С. 396–409.

7. Скобелева, Т.С. Рекомендации по проектированию нового поколения блоков пристроек к существующим зданиям общеобразовательных школ 2004 г. / Т.С. Скобелева, С.А. Бурмистрова; Москомархитектура, 2004. – URL: <http://russia.bestpravo.ru/fed2008/data034/tex034645/index.htm>

### References

1. Gusev, A.D. Investment attractiveness of using waste rubber products / A.D. Gusev, M.A. Derina, L.N. Petryanina // International Scientific Journal. – 2020. – No. 6. – P.30–36.

2. Derina, M.A. Comparative analysis of technical and economic indicators of design solutions for residential and public buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Chupryakov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P.75–79.

3. Konshina, E.E. On the implementation of the program for the modernization of the primary care system of the Russian Federation / E.E. Konshina, E.Y. Ogneva, N.A. Savchenko // Quality management in medicine. – 2021. – No. 1. – P. 4–7.

4. Morozova, Yu.A. Digital transformation of Russian healthcare as a factor in the development of the industry / Yu.A. Morozova // Intelligence. Innovation. Investment. – 2020. – No. 2. – P. 36–47.

5. Petryanina, L.N. The concept of technical and economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Yu.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1(42). – P.212–217.

6. Sanina, N.P. Aspects of the primary health care modernization program: problems and solutions / N.P. Sanina, M.V. Kravtsova // Economics and management. – 2021. – Vol. 27, No. 6 (188). – P. 396–409.

7. Skobeleva, T.S. Recommendations for the design of a new generation of extension blocks to existing buildings of secondary schools in 2004 / T.S. Skobeleva, S.A. Burmistrova; Moskomarchitektura, 2004. – URL: <http://russia.bestpravo.ru/fed2008/data034/tex034645/index.htm>

УДК 65.01

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_212

*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**Кондратьев Эдуард Викторович,**  
доктор экономических наук, профессор  
кафедры «Менеджмент», действительный  
член Академии проблем качества, бизнес-  
консультант  
E-mail: edwabc@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**Kondratyev Eduard Viktorovich,**  
Doctor of Economic Sciences, Professor of the  
Department «Management», Full Member of  
the Russian Academy of Quality Problems,  
Member of ASQ, Business-consultant  
E-mail: edwabc@yandex.ruИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-00410,  
<https://rscf.ru/project/24-28-00410/>

## ФРАКТАЙЛИНГ – УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРАКТИК РЕГУЛЯРНОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Э.В. Кондратьев

Предложена концепция фракталинга, которая решает проблему упрощения процесса управления в организации как рефлексивной полисубъектной среде на основе фрактального действия. В отличие от теории фрактальной организации Х.-Ю. Варнеке, делающей упор на фрактальную структурную, предложена концепция фрактального действия (фракталинг), позволяющего задать эффективное нелинейное масштабирование, опираясь на простые управленческие практики и самоорганизационные эффекты. Систематизированы предпосылки, дано определение фракталинга и представлены возможности на примере практики 5С. Показана эффективность фракталинга в ситуации лидерства сложности в полисубъектной среде. Приведены примеры эффективной апробации в России.

*Ключевые слова: практики регулярного менеджмента, синергетический менеджмент, фракталинг, полисубъектная среда*

## FRACTALING – MANAGEMENT THROUGH BEHAVIOR PATTERNS

E.V. Kondratyev

The article proposes the concept of fractaling, which solves the problem of simplifying the complexity of management in an organization as a reflexive polysubject environment based on fractal action. In contrast to the theory of fractal organization of X.-Y. Warnecke, who focuses on the fractals structure, proposed the concept of fractal action (fractaling), which allows for effective nonlinear scaling based on simple management practices and self-organizing effects. The prerequisites are systematized, a definition of fractaling is given, and the possibilities using the example of 5S practice are presented. The effectiveness of fractaling in a situation of complexity leadership in a polysubjective environment is shown. Examples of effective testing in Russia are given.

*Keywords: regular management practices, synergetic management, fractaling, polysubjective environment*

*Фрактальный подход является одновременно и эффективным и «естественным». Следует не только принять его с распространёнными объяснениями, но ещё и поразиться тому, как мы могли так долго без него обходиться.*

**Бенуа Мандельброт «Фрактальная геометрия природы»**

**Введение: укрощение сложности в жизни и управлении.** Долгое время в менеджменте организация представлялась простой системой, деятельность которой строится на принципе обратимости и предполагает возможность редукции. В результате современный менеджмент наполнен простыми алгоритмами и сценариями решения проблем. Когда же сложность эволюционирующей системы превосходит



некий порог, то возникает феномен необратимости, который выражается в несводимости системы к её элементам и взаимодействию между ними [4, с. 250]. Как же управлять сложностью, не боясь перспектив VUCA / BANI / SHIVA-мира?

Одно из изящных решений было найдено при изучении свойства самоподобия живых, сложноорганизованных структур. Бенуа Мандельброт предложил теорию фракталов [1], где он описал различные математические объекты – «фракталы», которые подобны сами себе на любом уровне рассмотрения (рис. 1 и 2). Современные фрактальные модели позволяют исследовать пространство между определённой и неопределённой.

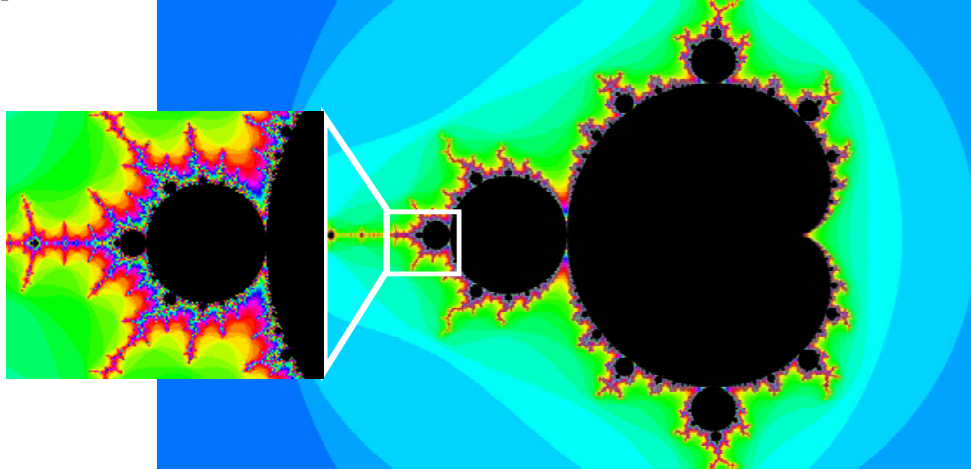


Рис. 1. Свойство самоподобия во фрактале Мандельброта

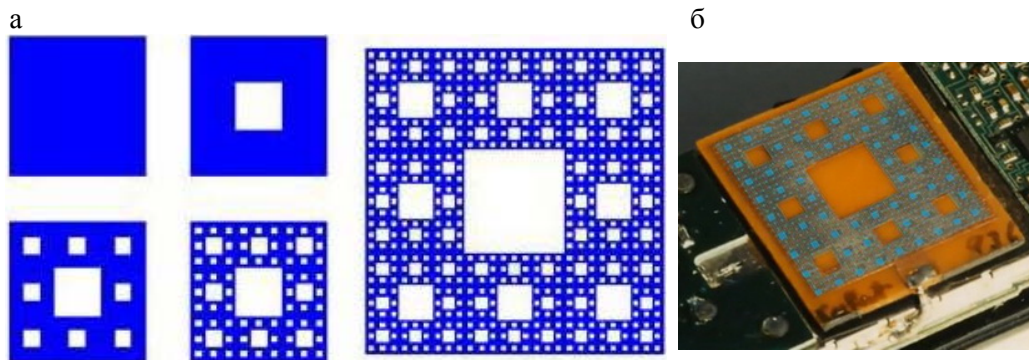


Рис. 2. а – формирование фрактала «ковёр Серпинского»;  
б – фрактальная форма антенны сотового телефона

Фрактал прост в том смысле, что его можно задать так называемым «генератором фрактала». Фрактал сложен, поскольку при многократном повторении генератора возникает сложный саморазвивающийся объект с совершенно новыми свойствами. Например, суть генератора фрактала «ковёр Серпинского» – исключить из квадрата, поделённого на 9 равных частей центральное окошко (рис. 2,а). Если эту процедуру повторить к каждому из 8 оставшихся квадратов несколько раз, то на практике из цельной металлической пластинки получается фрактальная антенна для сотовых телефонов (рис 2,б). При этом возникает новое качество пластинки – её новая форма, позволяющая расширить диапазон волн до 10 разных частот.

Российская школа синергетики предложила называть *фрактальными структурами* «структуры самоорганизации, обладающие свойством самоподобия, или масштабной инвариантности» [4, с. 206]. Объектами фрактальных моделей в науке стали: нервная система, коллектив, организация, университет, социально-политические процессы, а также структуры философского знания и познания.

Интерес фрактальных моделей для бизнеса представляют их объяснительные, прогностические и синергетические возможности. Свойство «самоподобие» объясняет повторение свойств объекта на микро-, мезо- и макроуровнях. Прогностические воз-

возможности основаны на феномене «генератор фрактала» – некоей процедуры (алгоритма, формулы), которая задаёт порядок развития, а синергетические возможности связаны с возникновением в системе новых свойств, которые и обеспечивают развитие.

### **От фракталов структур к фракталам управленческого действия**

Первую фундаментальную попытку фрактального описания организации предпринял Ханс-Юрген Варнеке в своей книге «Революция в предпринимательской культуре». Его «фрактальное предприятие» бросило вызов многовариантности факторов влияния и сложности, которые якобы не поддаются контролю [2, с. 19]. Варнеке предложил подход, в котором все подразделения и все до единого сотрудника способны к предпринимательскому мышлению и деятельности, и должны быть «пусть и маленькой, но «фрактальной фабрикой» [2, с. 159]. Он выделил два свойства фрактальных объектов: самоорганизацию и аналогичность и указал на обратную связь, которая «создаёт поразительное многообразие форм как отражение динамики развития» [2, с. 155]. «Регулирующим контуром» стал процесс определения цели с вовлечением всех участников. Коррекция целей отдела осуществлялась в итеративном процессе согласования [2, с. 189-195].

Проблему перехода в новое состояние Х.-Ю. Варнеке видит скорее в мышлении мастеров и руководителей, нежели в рядовых исполнителях. «Чрезмерные требования к высшему звену управления провоцируют его на всеобщие жёсткие методы регулирования», а мастера пытаются «...спонтанно развивающийся строй перевести в плановый», [2, с. 210-213].

Можно ли решить эту управленческую проблему застоя, с одной стороны, используя стандарты, которые могли бы устроить руководителей, с другой стороны, обеспечив гибкость развития предприятия. Это возможно, если генератором *фрактала* вместо структур организованности Х.-Ю. Варнеке станут структуры действия – управленческие алгоритмы, поведенческие рутины, названные М. Ротером «ката управления» [11, с. 2014]. Таким образом, предметом изучения становится регулярная операционная деятельность менеджера, в том числе так называемые «практики регулярного менеджмента» (ПРМ), представляющие собой устойчивую последовательность периодически повторяемых поведенческих паттернов и привычек мыследеятельности.

### **Метод фракталлинга**

**Фракталлинг (фрактальная деятельность)** – это метод управления развитием сложной системы, основанный на итеративной природе живого и заключающийся в воспроизведении управленческих моделей поведения (рутины, ката) исполнителями и их наставниками, масштабируемых от простых объектов к подсистемам и системе в целом в результате чего возникает новая организация среды.

Для работы системы нужна устойчивая структура с функцией «фрактального движения»: генератор, траектория, исполнитель и наставник [5]. В ней генератор управленческого фрактала – это управленческая техника (рутина, практика регулярного менеджмента), повторяющаяся по отношению к усложняющимся концентрическим совокупностям объектов управления. Повторение генератора фрактала на микро-, мезо- и макроуровнях организационной сложности способно создать эффективное дальное действие, которое несводимо к короткодействующим силам.

Почти все практики регулярного менеджмента могут быть рассмотрены в качестве *генераторов управленческого фрактала*. Для некоторых из них уже была предложена их фрактальная реализация: утренняя планёрка [6], визуальное управление эффективностью [7] и пр. *Траекторией* развёртывания управленческого фрактала становится структура управленческого воздействия: операции, процессы, организация и межорганизационные объединения. Третий элемент фрактальной структуры – исполнитель практики, который вступает в коммуникации разных уровней – с подчинённым, с группой, с коллективом. Наконец, наставник исполнителя практики – субъект, понимающий смыслы, носитель нравственного кода, качеств корпоративной культуры, который созидает или сдерживает активность развития. Важно, что М. Ротеру удалось заметить особенность культуры *Toyota*, где у каждого человека есть свой наставник или спарринг-партнёр, а их систематические беседы регулярно рожают новое знание.

Как правило, для освоения определённой ПРМ требуются специальные действия наставника, ассистирующего ученику в его исполнении практики. В рассмотренном далее примере мастер использует «мониторинг 5С» в качестве дуального для «5С». И это не единственный пример. Из наиболее известных ПРМ дуальные пары составляют:



«Ката совершенствования – ката коучинга» [10, с. 250-256], или «Стандартная операционная процедура (СОП) – Рабочий инструктаж (Job Instruction of TWI)».

Если говорить о фрактальном развёртывании ПРМ, то это повторяющееся на каждом уровне организации чередование двух активностей руководителя: а) личного исполнения и совершенствования ПРМ; б) научения последователя лучшему исполнению ПРМ. Фрактайлинг эффективен только в среде, где подчинённый воспринимается руководителем как последователь, а не исполнитель конкретного алгоритма или функции. Задача последователя овладеть и воспроизвести весь набор ПРМ, которым наставник овладел лично и передаёт свой опыт трансформации.

Фрактальная модель действия явно показывает ограничения традиционного управления, базирующегося на авторитарной этике и конкуренции. В конкурентной среде до 98 % усилий уходит на «защиту и подтверждение», а не на «создание и соразвитие». Мотивы субъекта и объекта часто не сонаправлены, и маловероятно, что подчинённый сформирует фрактальное действие, то есть повторит его и будет учить и тренировать своих подчинённых, воспроизводить тот же «генератор управленческого фрактала».

Фрактайлинг позволяет «упаковывать» рутинные действия со сложными объектами в простые модели (ПРМ, ката, рутины), аналогичные действиям с простыми объектами, а для современного предприятия – это важнейший управленческий результат. При этом вариабельность участников и процессов системы используется не как проблема, а как источник адаптации и развития.

#### **Практика применения фрактайлинга: процессы, коммуникации и обучение на примере 5С-ката**

Генератором управленческого фрактала служит стандартная техника «5С», состоящая из 5 шагов: «сортировка» (нужное – ненужное); «соблюдение порядка» (правильное размещение предметов); «содержание в чистоте» (уборка); «стандартизация» (установление норм и правил) и «совершенствование (воспитание)». Траекторию фрактала образует набор пар «материализованное место – процесс», где исполнители реализуют свои действия: «рабочее место – процедура»; «участок – процесс»; «предприятие – поток создания ценности».

Далее мы покажем, как взаимодействуют по созданию чистой и упорядоченной рабочей среды сотрудник и его руководитель. Описанный комплекс практик применим в любой сфере – в строительстве, производстве или в офисных процессах.

**На первом уровне** 5С-ката практикует работник на своём рабочем месте, где осуществляются его операции. А именно, он: 1) убирает лишние инструменты и материалы; 2) создаёт порядок, обеспечивающий наиболее эффективное исполнение работы; 3) очищает рабочее пространство; 4) фиксирует это состояние в стандартах; 5) непрерывно, по мере появления новых идей совершенствует рабочее место и себя в процессе улучшений. Именно этот уровень привычно воспринимается как реализация системы 5С – организация и порядок на рабочем месте.

**Вторую итерацию** практикует лидер группы (бригады, смены) на уровне процесса, объединяющего рабочие места. Лидер: 1) исключает лишние или включает в процесс необходимые рабочие места; 2) упорядочивает их; 3) «очищает» пространство рабочего участка от излишних материалов, создавая возможности для сокращения и выравнивания запасов и незавершёнки; 4) стандартизирует операции в потоке, визуализирует их на схемах участка; 5) совершенствует процесс, используя методы решения проблем и инициативы группы (бригады, смены).

**На третьем уровне** лидер воздействует на поток создания ценности для потребителя (ПСЦП). Его управленческие действия совершенно отличаются от действий исполнителя на первом уровне, но их логика также соответствует генератору фрактала: *пяти шагам наведения порядка и чистоты*. Лидер: 1) устраняет действия и операции, не добавляющие ценности для клиента; 2) выравнивает, синхронизирует ПСЦП (*Total Flow Management, хейдзунка*); 3) обеспечивает прозрачность ПСЦП, визуализируя производственные показатели; 4) использует систему «точно вовремя» (JIT) в качестве стандарта; 5) совершенствует поток методами проектно-процессного менеджмента (в т.ч. картированием ПСПЦ (*Value Stream Mapping*)).

Для апробации и изучения эффективности фрактайлинга был использован двухгрупповой замер на разных участках одного предприятия в течение месяца. В контрольной группе продолжалась стандартная реализация 5С: еженедельное наблю-

дение мастера за состоянием рабочих мест, замечания, рекомендации и выставление оценок на экране 5С. В экспериментальной группе генератор управленческого фрактала (5С) был применён к двум уровням: рабочим местам и участкам. Для обеспечения реализации 5С мастер применял «5С-мониторинг» – ежедневно обходил участок и беседовал с работниками об улучшении их рабочих мест, вёл график мониторинга рабочих мест и вносил выявленные в ходе бесед проблемы на доску решения проблем, что стало проявлением шагов: 1С, 2С, 3С и 5С.

В итоге у второй группы на фоне контрольной был зафиксирован явный рост вовлечённости персонала в улучшение своих рабочих мест, что вызвало рост производительности как каждого рабочего места в отдельности, так и всего участка. Последнее обеспечивалось тем, что мастера, осуществляющие мониторинг рабочих мест, применяли «1С», убирая лишние запасы, и «2С», выпрямляя поток. Таким образом, рабочие траектории движения материалов становились более короткими за счёт удачного размещения и ориентации в пространстве рабочих мест. Рост производительности был вызван не разовым ударным режимом работы, а непрерывным улучшением процесса, иницируемым и реализуемым самими сотрудниками. Вовлечённость и внутренняя заинтересованность рабочих через накопление опыта улучшений и рефлекссию привела к повышению компетенций сотрудников. Через месяц после начала эксперимента из сотрудников, «знающих 5С», они превратились в «адептов 5С», детально освоивших метод в процессе непрерывного улучшения своих рабочих мест.

В своих отзывах мастера отметили рост управляемости участком и увеличение скорости принятия решений. Снизилось время планёрок первого и второго уровней и в несколько раз увеличилось количество выявленных проблем, а также сократились сроки их решения. Мастера второй группы вспоминали, что вначале им было очень непросто заставить себя ежедневно делать обходы и беседовать с сотрудниками, и, если бы не поддержка их наставника, они бы вряд ли вышли на нормальный ритм работы. Но результаты их поразили, и они были очень рады, что научились сами и научили своих сотрудников «по-настоящему практиковать 5С».

Из примера видно, что фракталинг, во-первых, позволяет максимально быстро осваивать и непротиворечиво реализовывать управленческие практики, имеющие единую основу во всей организации, и во-вторых, способствует развитию как организации, так и системы управления.

### **Заключение: факторы эффективности фракталинга**

Подведём краткие итоги. Как же выстраивается эффективное управление на основе фракталинга? Как взаимодействуют основные факторы живой организации?

Организационный порядок формируется и задаётся совокупностью *генераторов управленческих фракталов* – стандартизированных практик регулярного менеджмента. Их совокупность в два–три раза меньше, чем беспорядочный набор различных техник без фрактального подхода.

*Лидер, ориентированный на непрерывное совершенствование*, непрерывно реализует стандартизированную ПРМ, обращая внимание на её эффективность как с позиции исполнителя, так и с позиции наставника. *Наставничество* на всех уровнях становится основным механизмом самовоспроизводимой передачи знаний и опыта в компании.

*Вариабельность*, присущая людям и процессам системы, запускает системную адаптацию всех ПРМ, а накопление и закрепление наиболее жизнеспособных образцов поведения в группе/коллективе, приводит к новой организации системы – работает институциональный механизм.

*Активизация чувственной сферы во взаимодействиях*: при отборе персонала, принятии решений, в настройке на работу, в проектных командах и пр. позволяет более целостно осваивать ПРМ.

*Целеполагание*, ориентированное на непрерывное совершенствование всех сторон существования организации, обеспечивает наиболее эффективное использование ресурсов системы, поскольку подцели каждого уровня гармонизируются в процессе межуровневой коммуникации.

Мы надеемся, что фракталинг откроет эффективное управление на основе субъектности и «человекоразмерности» саморазвивающихся систем.

## Список литературы

1. Mandelbrot, B. *Fractals: Form, Chance and Dimension* / B. Mandelbrot. – W H Freeman and Co, 1977. – 365 p.
2. Варнеке, Х.-Ю. Революция в предпринимательской культуре. Фрактальное предприятие : пер. с нем. яз. / Х.-Ю. Варнеке. – Москва : МАИК «Наука/Интерпериодика», 1999. – 280 с.
3. Джексон Т. Хосин канри: как заставить стратегию работать : пер. с англ. / Т. Джексон ; под ред. И. Попеско. – Москва : Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 248 с.
4. Князева, Е.Н. Основания синергетики: Синергетическое мировидение / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 256 с.
5. Кондратьев, Э.В. Фрактальный секрет «живой» системы практик регулярного менеджмента / Э.В. Кондратьев, Н.А. Митрофанов // Стандарты и качество. – 2022. – №11. – С. 56–62.
6. Кондратьев, Э.В. Практики регулярного менеджмента: планёрки трёх уровней / Э.В. Кондратьев, Н.А. Коробкова // Методы менеджмента качества. – 2025. – №4. – С. 44–50.
7. Кондратьев, Э.В. Практики регулярного менеджмента на российских предприятиях: визуальное управление эффективностью / Э.В. Кондратьев, О.А. Сазыкина, Р.Д. Лапин // Методы менеджмента качества. – 2025. – №1. – С.8–14.
8. Кондратьев, Э.В. Вызовы и возможности современного наставничества / Э.В. Кондратьев // Стандарты и качество. – 2024. – №13. – С. 88–91.
9. Пригожин, И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой : пер. с англ. / И. Пригожин, И. Стенгерс ; под общ. ред. и с послесл. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича, Ю.В. Сачкова. – Изд. 7-е. – Москва : Едиториал УРСС, 2014. – 304 с.
10. Ротер, М. Тойота Ката. Лидерство, менеджмент и развитие сотрудников для достижения выдающихся результатов / М. Ротер. – Санкт-Петербург : Питер Пресс, 2014. – 304 с.

## References

1. Mandelbrot, B. *Fractals: Form, Chance and Dimension* / B. Mandelbrot. – W H Freeman and Co, 1977. – 365 p.
2. Warneke H.-Yu. A revolution in entrepreneurial culture. Fractal enterprise : translated from German / H.-Yu. Warneke. – Moscow : MAIK Nauka/Interperiodics», 1999. – 280 p.
3. Hoshin kanri: how to make strategy work : translated from English / T. Jackson ; Edited by I. Popesco. – Moscow : Institute of Integrated Strategic Studies, 2008. – 248 p.
4. Knyazeva, E.N. Fundamentals of synergetics: Synergetic worldview. Stereotype publishing house / E.N. Knyazeva, S.P. Kurdyumov. – Moscow : LIBROCOM Book House, 2009. – 256 p.
5. Kondratiev, E.V. The fractal secret of the «living» system of regular management practices / E.V. Kondratiev, N.A. Mitrofanov // Standards and Quality. – 2022. – No. 11. – P. 56–62.
6. Kondratiev, E.V. Regular management practices: three-level planning / E.V. Kondratiev, N.A. Korobkova // Methods of quality management. – 2025. – No. 4. – P. 44–50.
7. Kondratiev, E.V. Regular management practices at Russian enterprises: visual performance management / E.V. Kondratiev, O.A. Sazykina, R.D. Lapin // Methods of quality management. – 2025. – No. 1. – P.8–14.
8. Kondratiev, E.V. Challenges and opportunities of modern mentoring / E.V. Kondratiev // Standards and quality. – 2024. – No. 13. – P. 88–91.
9. Prigozhin, I. Order from chaos: A new dialogue between man and nature : Translated from English / I. Prigozhin, I. Stengers ; Under the general editorship. and with the afterword by V.I. Arshinov, Yu.L. Klimontovich, Yu.V. Sachkov. – Ed. 7-E. – Moscow : Editorial URSS, 2014. – 304 p.
10. Rother, M. Toyota Kata. Leadership, management and employee development to achieve outstanding results / M. Rother. – St. Petersburg : Peter Press, 2014. – 304 p.

УДК 725.025.4 (091)

DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_218

Северо-Восточный федеральный  
университет имени М.К. Аммосова (СВФУ)  
Россия, 677000, г. Якутск,  
ул. Белинского, 58,  
тел.: (4112) 49-65-85.

**Потапова Анна Юрьевна**,  
старший преподаватель кафедры  
«Архитектура и градостроительство»  
E-mail: anna\_200073@mail.ru

**Местников Алексей Егорович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Прикладная механика  
и строительное материаловедение»  
E-mail: mestnikovae@mail.ru

Northeastern Federal University named after  
M.K. Ammosov (NEFU)  
Russia, 677000, Yakutsk, 58, Belinsky St.,  
tel.: (4112) 49-65-85.

**Potapova Anna Yurievna**,  
Senior Lecturer at the Department  
«Architecture and Urban Planning»  
E-mail: anna\_200073@mail.ru

**Mestnikov Alexey Egorovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Applied Mechanics and  
Building Materials Science»  
E-mail: mestnikovae@mail.ru

## КИРПИЧНОЕ ЗДАНИЕ ЯКУТСКОГО ОБЛАСТНОГО КАЗНАЧЕЙСТВА – ПАМЯТНИК АРХИТЕКТУРЫ НАЧАЛА XX ВЕКА

А.Ю. Потапова, А.Е. Местников

Приведены результаты комплексного исследования особенностей строительства и реставрации кирпичного здания Якутского областного казначейства, построенного в условиях вечномерзлых грунтов в 1909 г., на основе архивных материалов и натурных наблюдений. Выявлены новые сведения по технологии производства земляных и каменных работ в условиях вечномерзлых грунтов, а также создания декора фасада здания с применением местных материалов, что явилось прямым доказательством технических новшеств архитектора К.А. Лешевица. В чертежах и описаниях, письмах и сметах, собственноручно составленных К.А. Лешевичем, видна его приверженность к историческим традициям, преемственности и новаторству в области архитектуры и строительства. Благодаря его природному таланту, знанию, упорству и терпению впервые в условиях вечномерзлых грунтов были использованы уникальные технические решения в проектировании и строительстве гражданских зданий.

*Ключевые слова: история, памятник архитектуры, кирпичное здание начала XX в., вечномерзлые грунты, строительство, реставрация, технические решения*

## THE BRICK BUILDING OF THE YAKUTSK REGIONAL TREASURY IS AN ARCHITECTURAL MONUMENT OF THE EARLY 20TH CENTURY

A.J. Potapova, A.E. Mestnikov

The article presents the results of a comprehensive study of construction and restoration of the brick building of the Yakutsk Regional Treasury, built in permafrost conditions in 1909, based on archival materials and field observations. New information has been revealed on the technology of production of earth and stone works in permafrost conditions, as well as the creation of the facade decoration of the building using local materials, which has become a direct proof of the new technical innovations of architect K.A. Leshevich. In the drawings and descriptions, letters and estimates, personally compiled by K.A. Leshevich, one can see his commitment to historical traditions, continuity and innovation in the field of architecture and construction. Thanks to his natural talent, knowledge, perseverance and patience, for the first time in permafrost conditions, unique technical solutions were used in the design and construction of civil buildings.

*Keywords: history, architectural monument, brick building of the early twentieth century, permafrost, construction, restoration, technical solutions*

**Введение.** История каменного строительства из кирпича местного производства в условиях вечной мерзлоты г. Якутска была заложена еще в начале XVIII века [1]. Первым каменным сооружением считается кирпичное здание воеводческой канцелярии, проектирование и строительство которого велось с привлечением московских зодчих в 1701-1707 гг. Вплоть до конца XIX века из кирпича в основном строились церковные здания. До революции 1917 года в г. Якутске было построено всего 17 каменных зданий, из которых 11 гражданских и 6 культовых сооружений [2]. В период конца XIX – начала XX в. отмечается высокая активность строительства гражданских кирпичных зданий с участием инженеров из центральной части Российской империи, основу которых составили выпускники Петербургского института гражданских инженеров (Строительное училище до 1882 г.). Среди них особое место отводится Климентию Адамовичу Лешевичу, который работал с 1908 по 1913 год областным архитектором [3].

Этапы жизни и деятельности архитектора польского происхождения К.А. Лешевича основательно изучил историк П.П. Петров [4]. К основным творениям К.А. Лешевича, представляющим собой памятники истории и культуры, относятся следующие кирпичные здания г. Якутска [5]:

1. Якутское областное казначейство (1909 г.), ныне Галерея западноевропейского искусства имени М.Ф. Габышева.
2. Якутская городская публичная библиотека с читальным залом и музеем (1911 г.) – Национальная библиотека РС(Я).
3. Якутский окружной суд (1912–1914 гг.) – Академия наук РС(Я).
4. Архиерейские покои (1913 г.) – музей имени Е. Ярославского.

Научные исследования дореволюционной архитектуры г. Якутска начались только в 1990-е гг. с составления Н.П. Крадиным [6] каталога объектов, признанных памятниками архитектуры. По его мнению, кирпичное здание Якутского областного казначейства в инженерно-техническом плане явилось уникальным объектом для г. Якутска, где были заложены основы строительства каменных зданий в условиях вечномерзлых грунтов.

**Целью данного исследования** является расширение и углубление знаний об особенностях строительства и реставрации кирпичного здания Якутского областного казначейства на основе архивных материалов и натурных наблюдений.

**История строительства.** Для описания этапов проектирования и строительства старинных зданий достоверными первоисточниками являются подлинные архивные материалы [7-13]. В принятии решения, подготовке и утверждении проекта и сметы строительства кирпичного здания Якутского уездного (как было написано в архивных документах) казначейства присутствуют имена и подписи губернатора И.И. Крафта, архитектора К.А. Лешевича, и.о. губернатора и председателя комиссии А.И. Попова [7]. Утвержденная смета расходов (12 марта 1907 г.) составила 42499 рублей 80 копеек [8, л. 167].

Документ «Смета на постройку каменного здания Якутского уездного казначейства» (далее – смета) [8, л. 214-249] является бесценным подлинным историческим материалом, детально описывающим каждый этап и технологию производства строительно-монтажных работ.

**Фундамент.** Устройство фундамента (рис. 1), как описано в «земляных работах» сметы [8, л. 214-215]: «Для копания земли из рвов глубиной в 2,5 аршин и шириной 2 аршина», ... из котлована (ширина 1,2 сажень) под сплошной фундамент кладовой и площадок, глубиной 2 аршина». Эти параметры сходятся с размерами ленточных фундаментов из бутовых камней, устроенных в траншеях глубиной примерно 1,5–2 м и шириной не менее 1,5 м, в первых кирпичных зданиях [13]. Копание и выемка грунта производились, скорее всего, в летнее время глубиной не ниже чаши сезонного оттаивания земли, т.к. в смете не предусмотрены работы с мерзлым грунтом.

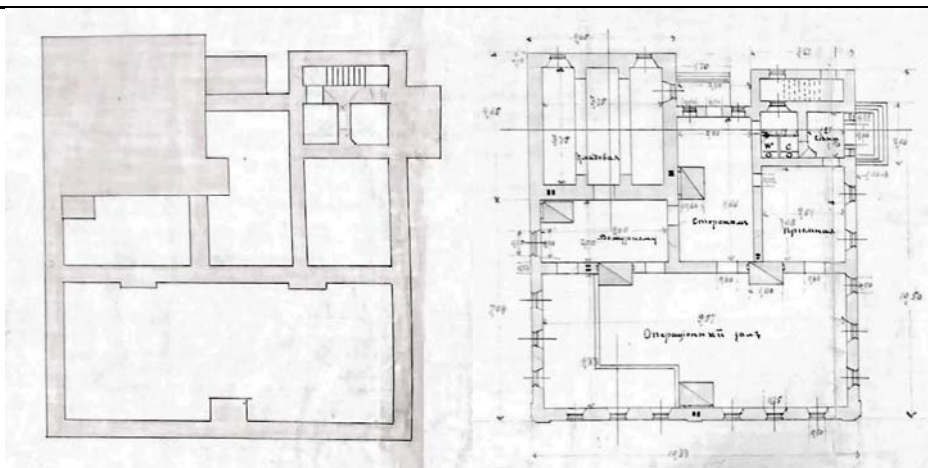


Рис. 1. Планы фундамента и здания [8, л.166]

Особые требования предъявляются к конструкциям кладовых помещений [8, л. 82]: «... необходимо, чтобы такие кладовые имели под всеми стенами сплошные фундаменты без отверстий, причем, на всем пространстве, занимаемом кладовой, под полом земля должна быть вынута глубиною до 2-х аршин и замещена забуткою из крупного камня, преимущественно твердых пород, на цементном растворе, на которой и может быть сделан пол асфальтовый, плитный или кирпичный» (рис. 2).

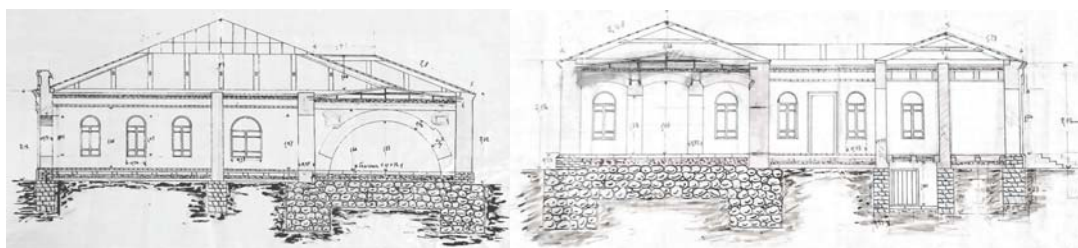


Рис. 2. Якутское казначейство: проект К.А. Лешевича, 1909 г. [8, л. 166]

В смете [8, л. 223] уточняется устройство монолитного пола: «для тщательной выстилки пола денежной кладовой лещадной плитой с подбуткой, плотной приправкой заусенков и перерубкою по надобности плиты на части...».

Технология устройства фундамента в «каменных работах» сметы [8, л. 216-218] состоит из нескольких этапов: «Для бучевания под кладовой, крупным булыжным камнем, по гидравлическому раствору, с плотной упаковкой камней с расщебенкою...», далее производится укладка следующего слоя из бутовых плит «по известковому раствору, с плотной защебенкой заусенков...», затем «для кладки на раствор по отвесу и ватерпасу цоколя из отборной бутовой плиты (4 ряда), с расщебенкою швов». При этом предусматривается обтеска плиты для цоколя.

Отличительной особенностью проекта здания казначейства К.А. Лешевича явилось то, что здесь впервые в условиях вечномёрзлых грунтов было предусмотрено использование подвального помещения (см. рис. 2) [8, л. 166]. Аналогичное решение наблюдаем и в его последующих объектах. Рациональность использования подвального помещения, например, в здании окружного суда заключалась в том, что калорифер снизу естественным образом обеспечивал подачу свежего теплого воздуха в актовый зал, в то время как в других помещениях стояли обычные печи для обогрева [12, л. 4-5].

**Стены и фасад.** Кладка стен производилась из местного обычного и профильного кирпича, изготавливаемого мастерами «по образчику... из глины хорошо выквашенной и надлежащим образом обожженной» [11, л. 36]. Для кладки кирпичей использовали известково-песчаный раствор, который со временем превращался в твердый камень, жестко скрепляющий кирпичи. Поэтому в реставрации кирпичного здания Якутского

казначейства разбор стены по «кирпичикам» даже не рассматривался проектом. В редких случаях в качестве арматуры применяли железные полосы: для укрепления стены денежной кладовой «проложить железные полосы на расстоянии одна от другой в 4 вершка» [8, л. 253], а также для усиления кирпичной кладки в северо-западной угловой части здания из-за появления деформационных трещин [8, л. 170].

Технология кладки кирпичей в сметах [8, л. 218-219] описывается так: «Для правильной, тщательной кладки кирпичных стен денежной кладовой, по шнуру, отвесу и ватерпасу, на цементном растворе, с расщебенкою и заливкою прыском каждого ряда, при толщине стены в 3,5 кирпича...». Для остальных наружных стен «с фасадной стороны» толщина стен составляет в 2,5 кирпича, внутренних стен – 2, 2-х арок денежной кладовой – 2,5, сводов – 1,5 кирпича.

При визуальном осмотре установлено, что кладка стен производилась стандартными кирпичами без профилей на известково-песчаном растворе. Для сложной декоративной кладки допускается «... теска кирпича для карнизов, поясков и прочих с подливкою на место, плашмя, бочком и ребриком ...». Отдельно расписывается кладка кирпича «в пилястрах с расшивкою наружных швов», «... баллюстрадов». В сметах описывается не столько технология, а расход материалов, перечень и трудо-затраты проводимых работ, но в них проглядывается сам процесс выполнения.

Для наглядности особенностей выполнения проекта и технологии устройства фундамента приведены планы фундамента и здания (см. рис. 1), разрезы здания с фундаментом (см. рис. 2). Историки и архитекторы, ранее так или иначе изучавшие здание казначейства (рис. 3), отмечали выполнение композиции фасадов с деталями и декором, арочными окнами и дверьми, башнеобразными углами, с высокой каменной стеной ограждения с коваными ажурными воротами, и другими декоративными элементами в стиле русской архитектуры XVII в. [3-6].



Рис. 3. Здание казначейства 1914 г. и 1958 г. (из Интернета)

**История реставрации.** Здание казначейства имело завидный срок эксплуатации даже по современным представлениям, исправно прослужило вплоть до 80-х годов прошлого столетия. Для восстановления здания обмерные работы начались с 2000 г. В 2005-2006 гг. предприятие под руководством Рудольфа Шельца производило восстановление здания уникальным способом разрезки и переноса стен цельными блоками на заранее подготовленную конструкцию свайного фундамента. В отличие от оригинала постройки восстановленное здание не имеет подвального помещения.

Основные реставрационные работы начались с укрепления основания кирпичных стен закладкой с двух сторон и скреплением металлических профилей по всему периметру здания (рис. 4).

Оконные и дверные проемы были замурованы кладкой из бетонных блоков. Стены разрезались механическим способом по вертикали на отдельные блоки. Подъем и перенос цельных блоков производились с помощью передвижного крана «Кировец» грузоподъемностью до 32 тонн и специального приспособления из металлических профилей (рис. 5-6).





Рис. 4. Укрепление основания кирпичной стены закладкой металлических профилей, г. Якутск (фото А.Е. Местникова)



Рис. 5. Укрепление кирпичных стен обмуровкой оконных и дверных проемов, г. Якутск (фото А.Е. Местникова)



Рис. 6. Установка и крепление цельных кирпичных блоков на свайный фундамент, г. Якутск, 08.06.2006 г. (фото А.Е. Местникова)

Как было отмечено в СМИ, на заключительном этапе выполнялись реставрационные работы фасада здания, окон и дверей, усиление и противопожарная обработка стропильной системы, замена утепления и пароизоляции мансардного этажа, а также замена покрытия полов и потолков. Кроме того, проводились работы по приспособлению здания к современному использованию. Основным новшеством данного объекта стала разработка и внедрение дизайн-проекта интерьера здания. В составе дизайн-проекта имеются выставочные стенды индивидуального дизайна с системами подвеса картин, интегрированные под общий стиль интерьера.



Таким образом, в условиях вечномерзлых грунтов г. Якутска в строительстве первых и последующих каменных (кирпичных) зданий XVIII – начала XX в. использовали ленточные фундаменты из бутовых камней, уложенных в заранее подготовленные траншеи и закрепленных известково-песчаным раствором. Следует отметить удивительную сохранность старинного здания в суровых условиях, связанных с вечной мерзлотой, резко континентальным климатом (морозы до  $-64^{\circ}\text{C}$ , летняя жара до  $+38^{\circ}\text{C}$ ), большими перепадами от минусовых до положительных температур ( $41-63^{\circ}\text{C}$ ) в весенний и осенний периоды. При изучении подлинных фотографий 1914-го, 1958-го и конца 80-х годов XX в. установлено, что в кирпичных стенах появились трещины, скорее всего, из-за неравномерной осадки фундамента и подтеков вследствие «прохудевшей» крыши из листового металла. Здание в целом выглядело «утонувшим в землю», что не соответствовало действительности и было вызвано неоднократным поднятием уровня прилегающих улиц при ремонтно-восстановительных работах. Поэтому выбор способа реставрации здания путем разборки кирпичных стен цельными блоками и их сборка на новом свайном фундаменте стал единственно верным решением.

**Заключение.** К уникальным решениям К.А. Лешевича в области архитектуры и строительства в условиях Якутии начала XX в. следует причислить следующие [4, 7-13]:

- устройство подвальных помещений в вечномерзлых грунтах;
- принцип строительства на вечномерзлых грунтах, впервые описанный им в пояснительной записке [9, л. 168]: «Зодчему необходимо пояснить, что ниже горизонта протаивание мерзлости грунта представляет, так сказать, сплошную скалу, прекрасную подошву для основания многоэтажных зданий, но при условии защиты оной от случайного протаивания ...»;
- применение «предохранительного» теплоизоляционного слоя в конструкции фундамента [9, л. 169]: «подошва их выстлана полубревнами в закрой, а равно и под полом полуподвала известковым впрыском, затем снизу положен слой золы в 2 вершка толщины, как наилучший материал худо проводящий тепло»;
- художественно-стилистическое многообразие преимущественно в формах русского стиля XVII в. с характерной композицией фасадов, деталей и декора [1].

### Список литературы

1. Петров, П.П. Весточка о северном камне // Столица и провинции: взаимоотношение центра и регионов в истории России / П.П. Петров // Материалы Всерос. научной конф. с международным участием / отв. ред. В.В. Карпова. – Вып. 9. – Санкт-Петербург : ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2018. – С. 95–98.
2. Самырова, А.Ю. Особенности возведения каменных гражданских зданий – памятников архитектуры начала XX века на вечной мерзлоте / А.Ю. Самырова // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 10. – С. 48–49.
3. Базилевич, М.Е. Гражданские инженеры – архитекторы Якутска (середина XIX – начало XX в.) / М.Е. Базилевич. – DOI: 10.7256/2310-8673.2021.3.36507 // Урбанистика. – 2021. – № 3.
4. Петров, П.П. К.А. Лешевич – основатель градостроения в Якутской области Российской империи / П.П. Петров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 4 (94), часть 2. – С. 101–106.
5. Памятники истории и культуры Якутской АССР. – Якутск : Кн. изд-во, 1978. – 88 с.
6. Крадин, Н.П. Архитектурное наследие Якутска / Н.П. Крадин. – Хабаровск : Арх. маст-кая Н.П. Крадина, 1992. – 103 с.
7. Национальный архив Республики Саха (Якутия). 165-И. Оп. 1. Д. 2492. Дело Якутской городской управы об отводе земли под постройку Якутского казначейства с приложением чертежа. 13.11.1908 г. – 18.03.1909 г. 12 л.

8. НА РС(Я). Ф. 12-И. Оп. 6. Д. 3009. Дело о строительстве каменного здания Якутского казначейства. 18.06.1897 г. – 07.01.1907 г. 261 л.
9. НА РС(Я). Ф.И-12. Оп.2. Д.4557 «а». Пояснительная записка к проекту и смете для постройки каменного здания Окружного суда в городе Якутск.
10. НА РС(Я).Ф. 165-и. Оп. 1. Д. 2402.
11. НА РС(Я). Ф. 235-и. Оп. 1., Д. 32а. Л. 36.
12. НА РС(Я). Оп. 106. Д. 46.
13. НА РС(Я). Ф.12. Оп. 1. Д.101. Л. 1.
14. Петров, П.П. Города Якутии, 1861-1917 гг. : (соц.-экон. очерк истории) / П.П. Петров. – Якутск : Якут. кн. изд-во, 1990. – С. 105–107.
15. Потапова, А.Ю. История Градо-Якутского кафедрального Троицкого собора в керамическом кирпиче / А.Ю. Потапова, С.В. Белолюбская, А.Д. Егорова. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-57-65 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 11. – С. 57–65.

## References

1. Petrov, P.P. News about the northern stone // Capital and provinces: the relationship between the center and the regions in the history of Russia / P.P. Petrov // Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation / Ed. by V.V. Karpov. – Issue 9. – St. Petersburg : Pushkin Leningrad State University, 2018. – P. 95–98.
2. Samyrova, A.Y. Features of the construction of stone civil buildings – architectural monuments of the early twentieth century on permafrost / A.Y. Samyrova // Modern high-tech technologies. – 2010. – No. 10. – P. 48–49.
3. Bazilevich, M.E. Civil engineers and architects of Yakutsk (mid-XIX – early XX century) / M.E. Bazilevich. – DOI: 10.7256/2310-8673.2021.3.36507// Urbanistics. – 2021. – No. 3.
4. Petrov, P.P. K.A. Leshevich – the founder of urban planning in the Yakut region of the Russian Empire / P.P. Petrov // International Scientific Research Journal. – 2020. – № 4 (94). Part 2. – P. 101–106.
5. Historical and cultural monuments of the Yakut ASSR. – Yakutsk : Publishing House, 1978. 88 p.
6. Kradin, N.P. Architectural heritage of Yakutsk / N.P. Kradin. – Khabarovsk : Arch. the master of N.P. Kradina, 1992. – 103 p.
7. National Archives of the Republic of Sakha (Yakutia). 165-I. Op. 1. 2492. The case of the Yakut City Council on the allocation of land for the construction of the Yakut Treasury with a drawing attached. 11/13/1908 – 03/18/1909 12 l.
8. ON THE PC(YA). F. 12-I. Op. 6. D. 3009. The case of the construction of the stone building of the Yakut Treasury. 06/18/1897 – 01/07/1907 261 l
9. ON RS (Ya). F.I-12. Op.2. d.4557 «а». Explanatory note to the project and estimate for the construction of a stone building of the District Court in the city of Yakutsk.
10. ON RS (Ya).F. 165-I. Op. 1. D. 2402.
11. ON RS (Ya). F. 235-I. Op. 1., D. 32а. L. 36.
12. ON RS (Ya). Op. 106. D. 46.
13. ON the RS (Ya). F.12. Op. 1. D.101. L. 1.
14. Petrov, P.P. Cities of Yakutia, 1861-1917 : (social and economic an essay on history) / P.P. Petrov. Yakutsk: Yakut Publishing House, 1990, pp. 105-107.
15. Potapova, A.Y. The history of the City of Yakutsk Trinity Cathedral in ceramic brick / A.Y. Potapova, S.V. Belolyubskaya, A.D. Egorova. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-57-65// Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. – 2020. – № 11. – P. 57–65.

# Указатель статей, опубликованных в 2025 году

## Index of articles, published in 2025

1. **Абдрахимов В.З.** Влияние фосфорного шлака на пористость клинкерного кирпича на основе отхода цветной металлургии. – №3(64). – С.43–53.
2. **Айзатуллин М.М., Зиятдинов С.Б., Сабитов Л.С., Гарькина И.А.** Узлы сопряжений порталных комбинированных опор. – №3(64). – С.111–120.
3. **Алфимова Н.И., Пириева С.Ю.** Влияние условий и длительности твердения на физико-механические характеристики изделий на основе гипсосодержащих отходов. – №2(63). – С.46–54.
4. **Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Алексеев Д.П.** Зависимость свойств водовоздушных смесей от степени дисперсности пузырьков воздуха. – №1(62). – С.153–162.
5. **Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Алексеев Д.П., Лебединский К.В.** Теоретический анализ процесса столкновения пузырьков воздуха в динамических дисперсных системах «вода – воздух». – №2(63). – С.167–173.
6. **Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Курносов Н.Е., Алексеев Д.П.** Экспериментальные исследования процесса работы напорного пневматического сатуратора. – №3(64). – С.154–162.
7. **Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Лебединский К.В., Алексеев Д.П., Марынов И.В.** Экспериментальное исследование процесса работы установки вихревой сатурации. – №4(65). – С.153–163.
8. **Баканова С.В.** Воздухообмен в помещениях хранения скоропортящейся продукции при горизонтальной системе воздухораспределения. – №1(62). – С.177–182.
9. **Баранов А.С., Зюзин Д.О.** Экспериментальные исследования композитных материалов для усиления железобетонных пролётных строений. – №4(65). – С.81–89.
10. **Бедов А.И., Ласьков Н.Н., Габитов А.И., Недосеко И.В., Салов А.С.** Эффективные методы восстановления и усиления фундаментов. – №3(64). – С.102–110.
11. **Береговой А.М.** Подходы к оценке тепловых потерь и радоновой безопасности подземных жилых зданий – землескребов. – №3(64). – С.209–215.
12. **Береговой А.М.** Тепломассоперенос в одно- и многослойных ограждающих конструкциях при экстремальных климатических воздействиях. – №2(63). – С.200–206.
13. **Береговой А.М.** Факторы влияния на энергоэффективность в единой энергетической системе здания. – №1(62). – С.200–205.
14. **Береговой В.А., Лавров И.Ю., Капустин А.Е.** Микроструктура и демпфирующие показатели мелкозернистого бетона. – №2(63). – С.60–67.
15. **Береговой В.А., Лавров И.Ю., Присевка А.С.** Формирование пористой структуры и теплопроводящие свойства стеклокристаллических заполнителей. – №1(62). – С.43–55.

- 
16. **Бодров М. В., Руин А.Е., Смыков А.А.** Экспериментальное исследование плотности теплового потока водяных инфракрасных излучателей. – №3(64). – С.126–134.
17. **Боронина Л.В.** Количественная оценка эффективности эксплуатации инженерных сетей коммунальной инфраструктуры – новое направление науки о трубопроводах. – №4(65). – С.174–182.
18. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Методические основы исследования композитов как сложных систем: от Бернштейна С.Н. до Моисеева Н.Н. – №2(63). – С.40–45.
19. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Методологические подходы к синтезу сложных слабоформализуемых систем. – №1(62). – С.35–42.
20. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Современные подходы к проектированию композиционных материалов как систем. – №2(63). – С.55–59.
21. **Варенцов В.К., Кузина В.В., Кошев А.Н.** Реакционная поверхность как одна из важнейших характеристик композитов и нанокompозитов на основе металлизации углеграфитовых волокнистых материалов. – №2(63). – С.92–98.
22. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И.** Краевой угол смачивания как критерий гидрофобизации поверхности гипса. – №2(63). – С.77–84.
23. **Гарипов А.Р., Макаров Д.Б., Хозин В.Г., Степанов С.В.** Модификация кровельных битумно-асбестовых мастик тонкодисперсными латексными эмульсиями. – №1(62). – С.75–82.
24. **Гарькин И.Н.** Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ. – №1(62). – С.192–199.
25. **Гарькин И.Н.** Реставрационно-реконструкционная трансформация объектов культурного наследия городской среды: современные подходы и классификация. – №3(64). – С.224–229.
26. **Гарькин И.Н., Галишникова В.В.** Методика детерминации степени деструкции объектов культурного наследия: системно-структурный анализ. – №2(63). – С.193–199.
27. **Гарькина И.А., Языев С.Б., Артемьев Д.А.** Оценка технического состояния строительных конструкций: энтропийный подход. – №4(65). – С.130–136.
28. **Гладышева М.В., Черушова Н.В.** Метод имитации в архитектуре постмодернизма. – №3(64). – С.216–223.
29. **Глазков Р.А., Кожухова Н.И.** Влияние способа получения шлакощелочного вяжущего на его физико-механические характеристики. – №2(63). – С.68–76.
30. **Гречишкин А.В., Андрианов К.А., Леденев В.И., Матвеева И.В.** Архитектура и конструкции церкви Воскресения Христа Спасителя в с. Красное знамя Тамбовской области. – №3(64). – С.190–198.
31. **Гречишкин А.В., Антонов А.И., Гусев В.П., Жоголева О.А.** Оценка влияния зазоров между акустическими экранами и опорной поверхностью на эффективность экранирования шума. – №1(62). – С.215–221.
32. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Чертес К.Л., Игнаткина Д.О.** Разработка технологии очистки подземных вод с повышенным содержанием органических и минеральных примесей. – №4(65). – С.145–152.
33. **Дергунова Е.С., Гончарова М.А., Ерофеев В.Т.** Комплексное исследование выносливости бетонов, модифицированных биодобавками. – №3(64). – С.20–25.
34. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Усова А.А.** Реконструкция подземных пространств зданий под укрытия. – №1(62). – С.222–229.
35. **Дымолазов М.А., Сабитов Л.С., Гарькина И.А.** Выявление резервов несущей способности структурных конструкций. – №1(62). – С.117–127.
36. **Еремкин А.И., Пономарева И.К., Чудайкина Т.Н., Мишин А.А.** Технические устройства для локализации загрязнений в культовых православных сооружениях. – №3(64). – С.135–145.
37. **Замалиев Ф.С., Замалиев Э.Ф.** Численные исследования деревобетонных перекрытий. – №2(63). – С.128–142.

38. **Зернов В.В., Зайцев М.Б., Агафонкина Н.В.** Методика практического расчета и проверки устойчивости поперечных рам каркаса со ступенчатыми стойками с учетом его пространственной работы. – №1(62). – С.135–140.
39. **Ибрагимов Р.А., Королев Е.В.** Оценка энергозатрат на активацию минеральных компонентов в аппарате вихревого слоя. – №1(62). – С.5–20.
40. **Ивашенко Ю.А., Шабиев С.Г.** Конструкции и материалы для экологического строительства жилых зданий. – №2(63). – С.122–127.
41. **Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г., Иванов А.В., Макридин Н.И.** Методы испытаний и обработка данных при испытаниях грунтов для расчета оснований зданий и сооружений. – №4(65). – С.11–20.
42. **Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г., Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Испытания глиношлаковых композитов в условиях одноосного и компрессионного сжатия. – №2(63). – С.5–23.
43. **Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г., Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Испытания глиношлаковых композитов в условиях одноплоскостного среза и трехосного сжатия. – №3(64). – С.26–42.
44. **Князева М.В., Казакова Я.А.** Проблема увековечивания разрушенных храмов: утраченные храмы Рязани как объекты религиозного туризма и культурного наследия. – №4(65). – С.192–201.
45. **Колесников Г.Н.** Саманные блоки исторических построек: аппроксимация результатов испытаний образцов. – №4(65). – С.45–51.
46. **Комаров В.А., Ласьков С.Н.** Прочность полос бетона между непересекающимися трещинами в сжато-растянутых опорных зонах изгибаемых элементов. – №1(62). – С.128–134.
47. **Кондратьев Э.В.** Фрактайлинг – управление на основе практик регулярного менеджмента. – №4(65). – С.212–217.
48. **Королев Е.В., Гришина А.Н., Данилов А.М., Айзенштадт А.М.** Оценка структурных эффектов от образования плёночной фазы матричного материала. – №1(62). – С.21–34.
49. **Королев Е.В., Гришина А.Н., Данилов А.М., Айзенштадт А.М.** Структурное уравнение прочности композиционных материалов. – №3(64). – С.5–19.
50. **Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л.** Применение накладных листов на заклепках при ремонте строительных конструкций. – №3(64). – С.97–101.
51. **Кошев А.Н., Кузина В.В., Гвоздева О.М., Варенцов В.К.** Оптимизация процесса металлизации углеродных волокон при распределенной реакционной поверхности углеграфитового волокнистого электрода. – №4(65). – С.32–37.
52. **Кузина В.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К., Кошев А.Н.** Математическое моделирование температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора. – №1(62). – С.183–191.
53. **Кузина В.В., Рыжов А.Д., Варенцов В.К., Кошев А.Н.** Изменение удельной реакционной поверхности углеграфитового волокнистого электрода при гальванической металлизации. – №3(64). – С.73–77.
54. **Куимова Е.И., Зайцева М.В., Логанина В.И., Езерский В.А.** Оценка качества сухих строительных смесей: метод аддитивной свертки. – №1(62). – С.90–97.
55. **Куимова Е.И., Логанина В.И., Рыжов А.Д.** Моделирование процесса самоочищения известковых покрытий. – №4(65). – С.38–44.
56. **Лазовский Д.Н., Тур В.В., Лазовский А.Д.** Влияние поперечного прижатия на работу сборных железобетонных многопустотных плит перекрытий в платформенных стыках со стенами многоэтажных зданий. – №1(62). – С.108–116.
57. **Лапшина Е.Г., Димаков Н.Д.** Деревянная высотная архитектура: башни. – №3(64). – С.199–208.
58. **Лесовик В.С., Сальникова А.С., Дудченко В.А.** Разработка композиционных вяжущих с использованием продуктов рециклинга керамического кирпича. – №4(65). – С.21–31.

59. **Логанина В.И., Езерский В.А.** Штукатурные растворы на гидравлической известке. – №2(63). – С.85–91.
60. **Логанина В.И., Пылаев В.С., Филинова М.И.** Трещиностойкость известковых покрытий с добавками полисахаридов. – №3(64). – С.65–72.
61. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Деформирование структуры легкого конструкционного бетона при одноосном сжатии. – №1(62). – С.56–67.
62. **Мартышкин Д.О.** Напряженно-деформированное состояние многорядных соединений деревянных конструкций с вклеенными стеклопластиковыми шайбами. – №1(62). – С.141–152.
63. **Мартышкин Д.О., Залилов И.В., Арискин М.В.** Несущая способность стеклопластиковых болтов соединений деревянных конструкций. – №2(63). – С.143–149.
64. **Медведева О.Н., Сауткина Т.Н.** Сравнение омагничивающей способности устройств для магнитной обработки воды. – №2(63). – С.159–166.
65. **Миронов В.В., Ерофеев Е.А., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Степанов О.А.** Технология получения горячей воды и льда с использованием энергии морских волн. – №3(64). – С.172–180.
66. **Москвин Р.Н., Белякова Е.А.** Кинетические особенности нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций, активизированных щелочными компонентами. – №1(62). – С.83–89.
67. **Москвин Р.Н., Белякова Е.А.** Особенности процессов каустификации активизаторов в композите и формирования прочности минерально-шлаковых вяжущих. – №2(63). – С.99–104.
68. **Низин Д.Р., Низина Т.А., Лукачевская И.Г., Чибулаев И.А., Спирин И.П., Пивкин Н.А.** Натурное климатическое старение эпоксидных полимеров строительного назначения в умеренном, субтропическом, экстремально холодном и арктическом климатах. – №4(65). – С.90–105.
69. **Николюкин А.Н., Антонов В.М., Монастырёв П.В., Лисовский В.А.** Применение методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей при прогнозировании несущей способности забивных свай. – №4(65). – С.115–129.
70. **Осипова Н.Н., Яковлев Д.С., Гришин Б.М.** Повышение эффективности эксплуатации баллонных установок при их заполнении сжиженным углеводородным газом. – №1(62). – С.169–176.
71. **Петрянина Л.Н., Дерина М.А., Усова А.А.** Архитектурно-планировочная модернизация школьных зданий и определение её направлений. – №4(65). – С.202–211.
72. **Пинус Б.И., Корнеева И.Г.** Время разрушения как показатель усталостного износа цементных композитов. – №1(62). – С.68–74.
73. **Пономарева И.К.** Разработка инновационных принципов климатизации в православных культовых сооружениях. – №4(65). – С.183–191.
74. **Потапова А.Ю., Местников А.Е.** Кирпичное здание Якутского областного казначейства – памятник архитектуры начала XX века. – №4(65). – С.218–224.
75. **Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Харьковская Н.Н., Бенаи Х.А., Фазылзянова Г.И.** Новейшая архитектура научно-исследовательских комплексов. – №2(63). – С.174–182.
76. **Разумов А.В.** Особенности архитектурной реорганизации стадионов «Лужники» (Москва) и «Маракана» (Рио-де-Жанейро). – №2(63). – С.183–192.
77. **Рожков В.С., Князев В.А., Князев А.А.** Новая технология интенсификации процесса нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств, предусматривающая использование реагента-окислителя феррата натрия. – №1(62). – С.163–168.
78. **Романенко И.И., Петровнина И.Н.** Влияние состава композиционного вяжущего на коррозионную стойкость бетонов. – №4(65). – С.52–59.
79. **Рыбаков В.А., Селиверстов А.В., Цветкова А.А.** Рациональные параметры ограждающих легких сталебетонных конструкций зданий. – №1(62). – С.98–107.
80. **Сальникова А.С., Елистраткин М.Ю., Казлитина О.В., Поспелова Е.А.** Исследование влияния микроармирующей добавки на физико-механические свойства высокопрочного самоуплотняющегося бетона. – №4(65). – С.60–72.

- 
81. **Селютина Л.Ф., Бочарова Е.С.** Информационное моделирование скатной крыши объекта культурного наследия в Петрозаводске. – №1(62). – С.206–214.
82. **Селяев В.П., Бабушкина Д.Р., Архипов И.В., Бусаргин Д.А.** Механика разрушения строительных материалов с неоднородной структурой под действием сжимающей нагрузки. – №2(63). – С.114–121.
83. **Селяев В.П., Лазарев А.Л., Архипов И.В.** Определение коэффициента интенсивности напряжений цельной и клееной древесины. – №4(65). – С.106–114.
84. **Снежкина О.В., Овчинников И.И.** Трещиностойкость железобетонных балок в зоне действия поперечных сил. – №4(65). – С.137–144.
85. **Соколова С.В., Сидоренко Ю.В.** Оптимизация физико-механических свойств бетонов специального назначения. – №2(63). – С.105–113.
86. **Степина И.В.** «Зеленые» строительные материалы на основе лигноцеллюлозного сырья. – №4(65). – С.73–80.
87. **Столяров Д.В., Королева Т.И.** Численное моделирование двухступенчатого сжигания метановодородных топливных смесей в кинетическом горелочном устройстве. – №4(65). – С.164–173.
88. **Столяров Д.В., Королева Т.И., Суровицкая Г.В.** Численное моделирование процесса сгорания метановодородных топливных смесей в теплогенерирующих установках. – №3(64). – С.146–154.
89. **Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В.** Расширение базы минеральных добавок для бетонов нового поколения. – №3(64). – С.54–64.
90. **Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В.** Формирование микроструктуры цементных материалов в присутствии химических модификаторов. – №2(63). – С.31–39.
91. **Титова Е.И., Акимова И.В.** Цифровые двойники в строительстве. – №3(64). – С.121–125.
92. **Фролов М.В., Курдин А.В.** Оценка теплотерь через наружные ограждающие конструкции отапливаемых подвалов. – №3(64). – С.163–171.
93. **Хомутов А.О., Усачев А.П., Рулев А.В.** Разработка метода и математической модели по устранению отложений мехпримесей между фильтрующими картриджами предварительной и тонкой очистки. – №3(64). – С.181–189.
94. **Черкасов В.Д., Бородин А.В.** Неотверждаемый герметик для применения на открытом воздухе. – №2(63). – С.24–30.
95. **Черкасов В.Д., Емельянов А.И.** Исследование механизма действия пенообразователей в цементных композитах. – №4(65). – С.5–10.
96. **Шаповалова А.В., Агеева М.С., Клюев С.В., Клюев А.В.** Тонкомолотые добавки для бетонной смеси на основе техногенного волокнистого материала и нанозолы. – №3(64). – С.78–86.
97. **Шеин А.И., Быков А.Н.** Современное состояние проблемы гашения колебаний зданий и сооружений. – №3(64). – С.87–96.
98. **Шеин А.И., Быков А.Н.** Уравнения движения системы «сооружение – перекрестные демпфирующие связи» при сейсмических возмущениях. – №2(63). – С.150–158.