

**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)

Редакторы: М.А. Сухова

Н.Ю. Шалимова

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 04.12.2024.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 27,625. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 155.

Дата выхода в свет 11.12.2024.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 1200 руб.

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
АРХИТЕКТУРА
И СТРОИТЕЛЬСТВО
4(61)/2024**

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

Гришина А.Н., Королев Е.В.
ОСОБЕННОСТИ РАННЕГО
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ
ВЯЖУЩИХ, СОДЕРЖАЩИХ ФУНГИЦИДНЫЙ
НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫЙ
МОДИФИКАТОР 5

Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т.
БИОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ 17

Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.
ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ
ПАРАДИГМЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ 24

**Орехова Т.Н., Фролова М.А., Сивальнева М.Н.,
Строкова В.В., Тюрин А.М.**
СВОЙСТВА САПОНИТСОДЕРЖАЩЕГО
МАТЕРИАЛА – ОТХОДА
ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ
АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ..... 29

Черкасов В.Д., Черкасов Д.В., Щербак А.Ю.
ЭЛАСТИЧНЫЕ САМОКЛЕЯЩИЕСЯ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ 40

Кузина В.В., Гвоздева И.Г., Кошев А.Н.
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ,
УВЛАЖНЕНИЯ И СУШКИ
ОБЪЕМНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 48

Абдрахимов В.З.
РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИИ
В ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОТУПОРОВ
БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННОГО
ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ 54

Тараканов О.В., Ильина Л.В., Гичко Н.О.
ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР
НА МИКРОСТРУКТУРУ, КИНЕТИКУ
ТВЕРДЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ 63

© Авторы публикаций, 2024

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2024

© ПГУАС, 2024

Ермаков А.А., Захарова Е.А., Родин А.И. СТОЙКОСТЬ ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ 73	Чмых Н.В., Третьякова О.В. СНИЖЕНИЕ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН: РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ 156
Логанина В.И., Пылаев В.С. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИСАХАРИДОВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВЫХ КОМПОЗИТОВ 81	Шеин А.И. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – РЕАКТИВНЫЙ ГАСИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ 165
Очкина Н.А., Лаврова О.В., Шмарова Т.С., Очкин И.А. РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ВЫСОКОПЛОТНЫЕ КОМПОЗИТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 88	ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ 171
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ 97	Хомутов А.О., Усачев А.П., Рулев А.В. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО КОЛИЧЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАССЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ДЛЯ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ, РАЗМЕЩЕННЫХ ВНУТРИ ОДНОГО КОРПУСА 171
Селяев В.П., Бабушкина Д.Р., Безрукова Е.С., Селяева С.П. ПОПЕРЕЧНАЯ СИЛА, ВОСПРИНИМАЕМАЯ БЕТОНОМ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ 97	Рожков В.С., Яхкинд М.И., Князев А.А. ХИМИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА В СИНТЕЗЕ ФЕРРАТА НАТРИЯ НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ 181
Овчинников И.Г., Разов И.О. БИОНИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОСТОСТРОЕНИИ 104	Великанов Н.Л., Наумов В.А. РАСХОД ВОЗДУХА ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛЬНОЙ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МУСОРОУДАЛЕНИЯ 190
Дымолазов М.А., Сабитов Л.С., Гарькина И.А. РЕШЕТЧАТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ПОНИЖЕННОЙ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ 116	АРХИТЕКТУРА 198
Гринько Е.А. ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР И ОБОЛОЧЕК СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 128	Соколова Н.В., Косарева В.Д. СТАТУС ИСТОРИЧЕСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ: ОЦЕНКА ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЕНЗЫ 198
Карпов В.Н. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ РЕБЕР ПАНЕЛЕЙ ПОЛНОСБОРНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ДОМОВ 142	Гладышева М.В. ПРОЯВЛЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЕ 209
Снежкина О.В., Корнюхин А.В. ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ 148	Указатель статей, опубликованных в 2024 году 217

Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	Loganina V.I., Pylaev V.S. THE INFLUENCE OF SYNTHETIC POLYSACCHARIDES ADDITIVES ON STRUCTURE FORMATION OF LIME COMPOSITES	81
Grishina A.N., Korolev E.V. FEATURES OF EARLY STRUCTURE FORMATION OF COMPOSITE CEMENT BINDERS CONTAINING FUNGICIDAL NANO- AND MICROSIZE MODIFIER	5	Ochkina N.A., Lavrova O.V., Shmarova T.S., Ochkin I.A. RADIATION-PROTECTIVE HIGH-DENSITY COMPOSITES FOR SPECIAL PURPOSES	88
Gavrilov M.A., Erofeev V.T. BIOSTABILITY OF MODIFIED EPOXY COMPOSITES.....	17	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS	97
Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. IDENTIFICATION AND MODERN PARADIGMS IN MATERIALS SCIENCE....	24	Selyaev V.P., Babushkina D.R., Bezrukova E.S., Selyaeva S.P. THE TRANSVERSE FORCE PERCEIVED BY CONCRETE DURING THE DESTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENTS ALONG INCLINED SECTIONS	97
Orekhova T.N., Frolova M.A., Sivalneva M.N., Strokova V.V., Tyurin A.M. PROPERTIES OF SAPONITE-CONTAINING MATERIAL – A WASTE OF MINING AND PROCESSING INDUSTRY OF THE ARKHANGELSK DIAMONDIFEROUS PROVINCE.....	29	Ovchinnikov I.G., Razov I.O. BIONIC DESIGN AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN BRIDGE ENGINEERING	104
Cherkasov V.D., Cherkasov D.V., Shcherbak A.Y. ELASTIC SELF-ADHESIVE RADIO- ABSORBING COATINGS	40	Dymolazov M.A., Sabitov L.S., Garkina I.A. LATTICE SPATIAL COATINGS OF REDUCED METAL CONTENT	116
Kuzina V.V., Gvozdeva I.G., Koshev A.N. RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF METALLIZATION, MOISTENING AND DRYING OF VOLUMETRICALLY POROUS MATERIALS.....	48	Grinko E.A. THE TYPES OF SPATIAL CURVILINEAR STRUCTURES AND SHELLS OF BUILDING PURPOSE.....	128
Abdrakhimov V.Z. RECYCLING OF METALLURGICAL WASTE IN THE PRODUCTION OF ACID RESISTANCE WITHOUT THE USE OF TRADITIONAL NATURAL RAW MATERIALS.....	54	Karpov V.N. BEARING CAPACITY AND STIFFNESS OF PANELS RIBS OF FULLY PREFABRICATED WOODEN HOUSES	142
Tarakanov O.V., Ilyina L.V., Gichko N.O. THE EFFECT OF NEGATIVE TEMPERATURES ON THE MICROSTRUCTURE, HARDENING KINETICS AND STRENGTH OF CEMENT MATERIALS.....	63	Snezhkina O.V., Korniyukhin A.V. STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS DURING DESTRUCTION ALONG AN INCLINED SECTION.....	148
Ermakov A.A., Zakharova E.A., Rodin A.I. RESISTANCE OF POROUS GLASS CERAMICS FROM ZEOLITE-CONTAINING ROCKS TO THE IMPACT OF MOLD FUNGI	73	Chmykh N.V., Tretiakova O.V. REDUCTION OF THE FROST HEAVE EFFECT ON RETAINING WALLS: RATIONAL DESIGN	156
		Shein A.I. DIFFERENTIAL EQUATIONS OF MOTION OF THE «STRUCTURE – REACTIVE VIBRATION DAMPENER» SYSTEM UNDER SEISMIC DISTURBANCES	165

ENGINEERING SYSTEMS	171	Velikanov N.L., Naumov V.A. AIR CONSUMPTION BY THE TRANSPORT LINE OF A VACUUM WASTE DISPOSAL SYSTEM	190
Khomutov A.O., Usachev A.P., Rulev A.V. DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLE AND MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE ECONOMICALLY FEASIBLE NUMBER OF CYLINDRICAL PRE- AND FINE CLEANING CASSETTES FOR LIQUID AND GASEOUS FUELS, PLACED INSIDE ONE HOUSING.....	171	ARCHITECTURE	198
Rozhkov V.S., Yakhkind M.I., Knyazev A.A. CHEMICAL AND ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF IRON COMPOUNDS IN SODIUM FERRATE SYNTHESIS AT SEWAGE TREATMENT FACILITIES	181	Sokolova N.V., Kosareva V.D. STATUS OF A HISTORICAL SETTLEMENT: ASSESSMENT OF THE HISTORICAL AND CULTURAL POTENTIAL OF PENZA	198
		Gladysheva M.V. MANIFESTATION OF IMITATION SPACE IN ARCHITECTURAL ENVIRONMENT	209
		Index of articles, published in 2024 ...	217

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.54

DOI 10.54734/20722958_2024_4_5

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

Гришина Анна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник кафедры
«Технология строительных материалов
и метрологии»
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

Королев Евгений Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе, профессор
кафедры «Технология строительных
материалов и метрологии»
E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru

*St. Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering*
Russia, 190005, St. Petersburg, 4,
Second Krasnoarmeyskaya St.,
tel: +7 (812) 316-53-11

Grishina Anna Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
«Technology of Construction Materials
and Metrology»
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

Korolev Evgeny Valerievich,
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for
Scientific Work, Professor of the Department
«Technology of Construction Materials and
Metrology»
E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru

Работа выполнена в рамках исполнения гранта СПбГАСУ 2024 г.

ОСОБЕННОСТИ РАННЕГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ, СОДЕРЖАЩИХ ФУНГИЦИДНЫЙ НАНО- И МИКРОРАЗМЕРНЫЙ МОДИФИКАТОР

А.Н. Гришина, Е. В. Королев

Для обеспечения биобезопасности в зданиях и сооружениях используются биоцидные вяжущие, которые обеспечивают длительную объемную защиту. В качестве фунгицидного модификатора целесообразно применение гидросиликатов меди, которые, однако, замедляют процессы гидратации портландцемента. Целью работы является поиск способов ускорения гидратации портландцемента, содержащего гидросиликаты меди, которые обеспечивают получение цементного камня с высокими эксплуатационными свойствами. Для ускорения схватывания использовались соли-ускорители схватывания и наноразмерные гидросиликаты цинка с различными характеристиками. В качестве фунгицидного вяжущего применилось композиционное вяжущее на основе портландцемента, содержащего микроразмерные гидросиликаты бария и меди. Влияние ускорителей схватывания на структурообразование вяжущего оценивалось по кинетике изменения глубины погружения иглы прибора Вика в композиционное цементное тесто. Применение ускорителей схватывания позволяет уменьшить продолжительность индукционного периода, однако продолжительность схватывания увеличивается. Структурообразование материала протекает поэтапно. Используемые добавки изменяют характеристики и количество этапов структурообразования. Поэтапная оценка скорости

структурообразования материалов и относительного отклонения скорости каждого этапа в сравнении с цементным тестом показала, что имеется наномодификатор на основе гидросиликатов цинка, который позволяет приблизить показатели структурообразования наномодифицированного композиционного теста к показателям цементного теста. Показано, что использование наномодификатора на основе гидросиликатов цинка и солей-ускорителей позволяет нивелировать негативное влияние гидросиликатов меди на структурообразование композиционного вяжущего. При этом параметры кинетики формирования структуры приближены к показателям структурообразования цементного камня.

Ключевые слова: композиционное вяжущее, ускорители схватывания, структурообразование, модификатор, фунгицид, нано- и микроразмерные частицы, гидросиликаты металлов, портландцемент

FEATURES OF EARLY STRUCTURE FORMATION OF COMPOSITE CEMENT BINDERS CONTAINING FUNGICIDAL NANO- AND MICROSIZE MODIFIER

A.N. Grishina, E.V. Korolev

To ensure biosafety in buildings and structures, biocidal binders are used, which provide long-term volumetric protection. As a fungicidal modifier, it is advisable to use hydrosilicates of copper, which, however, slow down the hydration processes of portland cement. The aim of the work is to find ways to accelerate the hydration of portland cement containing hydrosilicates of copper, as well as to ensure the production of cement stone with high performance properties. To accelerate setting, setting accelerator salts and nanoscale of hydrosilicates of zincum with various characteristics were used. A composite binder based on portland cement containing micro-sized barium and hydrosilicates of copper was used as a fungicidal binder. The effect of setting accelerators on the structure formation of the binder was estimated by the kinetics of the change in the depth of immersion of the needle of the Vica device in the composite cement dough. The use of setting accelerators reduces the duration of the induction period, but the duration of setting increases. The structure formation of the material proceeds in stages. The additives used change the characteristics and the number of stages of structure formation. A step-by-step assessment of the rate of structure formation of materials and the relative deviation of the speed of each stage in comparison with the cement test have shown that there is a nanomodifier based on hydrosilicates of zincum, which makes it possible to approximate the indicators of structure formation of the nanomodified composite test to the indicators of the cement test. It is shown that the use of a nanomodifier based on hydrosilicates of zincum and accelerator salts makes it possible to neutralize the negative effect of hydrosilicates of copper on the structure formation of a composite binder. At the same time, the parameters of the kinetics of structure formation are close to the parameters of cement stone structure formation.

Keywords: composite binder, setting accelerators, structure formation, modifier, fungicide, nano- and micro-sized particles, metal hydrosilicates, portland cement

Введение

Одним из актуальных вопросов современного строительства является повышение срока эксплуатации строительных конструкций и увеличение продолжительности межремонтных периодов [1]. В условиях влажного климата, а также при некоторых нарушениях в технологии строительства создаются условия для размножения и развития плесневых грибов, которые в результате своей жизнедеятельности разрушают строительные материалы [2], а также оказывают отрицательное влияние на здоровье человека [3–5].

Перспективным решением указанной проблемы является использование композиционного вяжущего, обеспечивающего объемное фунгицидное действие, препятствующее как заражению материала, так и развитию мицелия грибов. Создание такого композиционного вяжущего осуществляется совмещением портландцемента и искусственно синтезированных модификаторов – гидросиликатов бария и меди. При этом ионы бария и меди оказывают фунгицидное действие на споры грибов, препятствуя заражению ими строительного материала. Однако использование меди существенно замедляет схватывание вяжущего [6], особенно при концентрации гидро-

силикатов меди 1 % и более от массы портландцемента. Этот замедляющий эффект существенно ограничивает использование такого композиционного вяжущего.

Механизм торможения гидратации обусловлен образованием на поверхности частиц алюмината кальция и трёхкальциевого силиката гелеобразных защитных плёнок из труднорастворимого гидроксида меди. При этом растворимость гидроксида меди составляет $1,73 \cdot 10^{-5}$ г/л, что существенно (почти в 10000 раз) ниже, чем у гидроксида кальция. Образующаяся оболочка имеет низкую диффузионную проницаемость для воды, в результате чего гидратация минералов сильно замедляется.

Очевидно, что применение гидросиликатов меди приводит также к замедлению структурообразования и изменяет характеристики формирующейся структуры материала. Отсюда целью нашего исследования являлся поиск способов ускорения гидратации портландцемента, содержащего гидросиликаты меди, обеспечивающих получение искусственного камня с высокими эксплуатационными свойствами.

Методы и материалы

Решение поставленной задачи возможно с применением различных подходов. Рациональным является способ, учитывающий химические и физические свойства гидросиликатов меди, а также ускоряющее действие центров кристаллизации, представленных наноразмерными частицами. Указанное предположение (гипотезу) можно обосновать следующим образом.

Как известно, гидросиликаты меди являются малорастворимыми веществами, поэтому их влияние на гидратацию и структурообразование происходит после их растворения, в отличие от водорастворимых солей, используемых в составе воды затворения. Поэтому возможно инициировать процессы ускорения гидратации до формирования оболочки из гидроксида меди на поверхности минералов клинкера. Согласно [7–8] в качестве ускорителей схватывания используются соли, образующие при взаимодействии с ионами кальция нерастворимые соединения. К таким веществам относят, например, водорастворимые сульфаты, карбонаты щелочных металлов. Кроме того, следует отметить, что применение щелочных компонентов (в случае обеспечения высокой локальной концентрации) может приводить к образованию комплексных солей и частично растворять оболочку из гидроксида меди.

Очевидно, что эффективность способа ускорения кристаллизации посредством введения дополнительной поверхности возрастает с увеличением площади поверхности. Как известно, площадь поверхности частицы от её объёма возрастает обратно пропорционально радиусу частицы r , то есть

$$\frac{S}{V} = \frac{1}{r}.$$

Отсюда очевидна рациональность применения наноразмерных частиц для ускорения схватывания.

Для исследования возможности управления ранней гидратацией композиционного вяжущего использовались: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 производства компании ЦЕМРОС (г. Санкт-Петербург), микроразмерные гидросиликаты бария и меди, полученные по технологии осаждения жидкого стекла [9]. Композиционное вяжущее из указанных компонентов изготавливалось путём совмещения совместным помолом портландцемента, гидросиликатов бария в количестве 10 % и гидросиликатов меди в количестве 1 % (содержание гидросиликатов металлов представлено в % от массы портландцемента). Средний диаметр частиц полученных гидросиликатов бария и меди составлял 5...7 мкм. Для исследований изготавливалось цементное тесто нормальной густоты. Для управления структурообразованием композиционного цементного теста использовались наноразмерные гидросиликаты цинка различного состава и концентрации (табл. 1), полученные по технологии [10], добавки-ускорители схватывания – сульфат лития, карбонат натрия.

Характеристики гидросиликатов цинка $ZnO \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$

Номер состава	Расчётное соотношение SiO_2 / ZnO	Концентрация наноразмерных гидросиликатов цинка, %	Средний диаметр частиц, нм
1	2,35	0,028	13...14
2	3,92	0,041	12...13
3	5,49	0,054	14...15
4	4,70	0,047	11...12
5	7,84	0,073	15...16
6	10,97	0,099	21...22
7	7,05	0,067	13...14
8	11,76	0,105	20...21
9	16,46	0,144	29...30

Исследование раннего структурообразования цементных композиций, содержащих добавки, имеющие различный химический состав и дисперсность, проводили на составах, представленных в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Составы цементных композиций

№	Наименование	Обозначение	Состав, %			
			ПЦ	В	МК	НД
1	Цементное тесто	ЦТ	76,92	23,07	–	–
2	Композиционное цементное тесто	КЦТ	68,25	24,25	7,50	–
3	Наномодифицированное композиционное цементное тесто	НМКЦТ	68,25	–	7,50	24,25

П р и м е ч а н и я : ПЦ – портландцемент; В – вода; МК – микроразмерная минеральная добавка; НД – наноразмерная добавка.

Исследование раннего структурообразования композиционного цементного теста проводилось путём определения глубины погружения иглы прибора Вика в композиционное цементное тесто нормальной густоты с момента затворения смеси до момента прекращения погружения иглы прибора Вика. Цементное тесто изготавливалось согласно методике, описанной в ГОСТ 30744-2001. Для оценки влияния добавок на раннюю гидратацию портландцемента оценивалась продолжительность индукционного периода T_{ip} , продолжительность структурообразования (период времени от момента затворения до момента прекращения погружения иглы прибора Вика) T_{st} , длительность структурообразования $T_{er.st}$ (период исследуемого структурообразования от начала схватывания до времени, когда игла прибора Вика перестаёт погружаться в цементное тесто) и скорость роста прочности материала. Указанные исследуемые периоды взаимосвязаны следующим образом:

$$T_{st} = T_{ip} + T_{er.st}.$$

С использованием указанных кинетических характеристик проводилась оценка эффективности применения способов ускорения гидратации портландцемента в присутствии гидросиликатов меди.

Результаты и их обсуждение

Анализ типичной кинетики изменения глубины погружения иглы прибора Вика в композиционное цементное тесто (рис. 1) показывает, что процессы схватывания цементного теста протекают неравномерно. Наблюдаются отдельные этапы структурообразования, продолжительность которых устанавливается изменением параметров

структурообразования, что наблюдается как для схватывания цементного теста, так и модифицированных составов. Такой характер изменения глубины проникания иглы согласуется с результатами исследований о самоорганизации вяжущего в период схватывания и твердения [11].

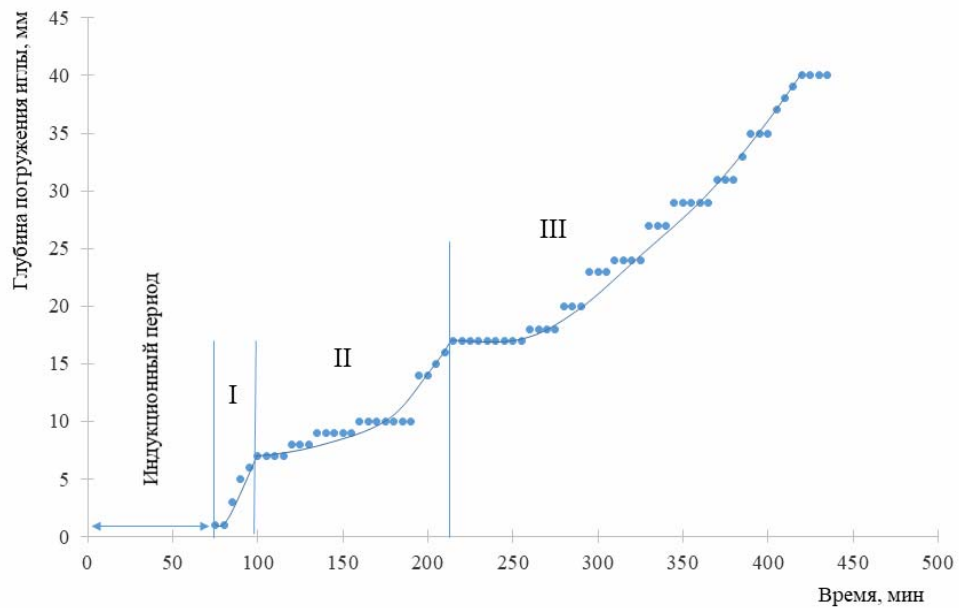


Рис. 1. Кинетика погружения иглы прибора Вика в композиционное цементное тесто (общий вид)

Для цементного теста и композиционного цементного теста, в том числе модифицированного, наблюдается 3 или 4 этапа структурообразования за период испытаний. Однако указанные этапы имеют различные характеристики, которые представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
Характеристики структурообразования цементных композиций

Вид вяжущего	Добавка	T_{ip} , мин	$T_{er.st}$, мин	Параметры этапа структурообразования*			
				1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
1	2	3	4	5	6	7	8
ЦТ	–	165	150	$\frac{60}{0,13}$	$\frac{40}{0,40}$	$\frac{30}{0,33}$	$\frac{20}{0,25}$
КЦТ	–	396	159	$\frac{35}{0,34}$	$\frac{50}{0,14}$	$\frac{85}{0,21}$	$\frac{45}{0,04}$
	0,5 % Li_2SO_4	75	345	$\frac{25}{0,24}$	$\frac{35}{0,06}$	$\frac{286}{0,11}$	–
	1 % Li_2SO_4	80	330	$\frac{15}{0,40}$	$\frac{60}{0,12}$	$\frac{200}{0,11}$	$\frac{55}{0,09}$
	2 % Li_2SO_4	80	315	$\frac{30}{0,20}$	$\frac{235}{0,12}$	$\frac{50}{0,08}$	

1	2	3	4	5	6	7	8
НМКЦТ	состав №1**	135	370	$\frac{45}{0,20}$	$\frac{75}{0,07}$	$\frac{185}{0,10}$	$\frac{95}{0,11}$
	состав №2	100	285	$\frac{50}{0,28}$	$\frac{165}{0,13}$	$\frac{70}{0,04}$	
	состав №3	85	280	$\frac{25}{0,24}$	$\frac{205}{0,14}$	$\frac{50}{0,08}$	
	состав №4	120	310	$\frac{15}{0,73}$	$\frac{110}{0,11}$	$\frac{140}{0,10}$	$\frac{45}{0,04}$
	состав №5	110	305	$\frac{35}{0,40}$	$\frac{95}{0,08}$	$\frac{135}{0,10}$	$\frac{25}{0,11}$
	состав №6	95	330	$\frac{15}{0,40}$	$\frac{30}{0,17}$	$\frac{275}{0,11}$	
	состав №7	80	410	$\frac{90}{0,07}$	$\frac{210}{0,09}$	$\frac{650}{0,09}$	$\frac{45}{0,32}$
	состав №8	90	более 405	$\frac{105}{0,13}$	$\frac{105}{0,03}$	$\frac{195}{0,22}$	
	состав №9	80	> 370	$\frac{125}{0,08}$	$\frac{130}{0,07}$	$\frac{115}{0,05}$	
НМКЦТ (состав №3)	0,5 % Na_2CO_3	90	370	$\frac{40}{0,13}$	$\frac{60}{0,11}$	$\frac{190}{0,17}$	$\frac{65}{0,06}$
	0,5 % Li_2SO_4	65	405	$\frac{90}{0,12}$	$\frac{125}{0,02}$	$\frac{80}{0,28}$	$\frac{95}{0,17}$
	1 % Li_2SO_4	70	300	$\frac{60}{0,06}$	$\frac{70}{0,09}$	$\frac{120}{0,09}$	$\frac{60}{0,13}$
	2 % Li_2SO_4	35	315	$\frac{60}{0,18}$	$\frac{85}{0,10}$	$\frac{90}{0,11}$	$\frac{80}{0,11}$

П р и м е ч а н и я : T_{ip} – продолжительность индукционного периода; $T_{er.st}$ – продолжительность периода раннего структурообразования; * – в числителе указана продолжительность этапа структурообразования, мин; в знаменателе указана скорость роста прочности на этапе, мм/мин; ** – представлен в табл. 1.

Анализ данных табл. 2 показывает, что использование всех исследуемых ускорителей схватывания приводит к сокращению индукционного периода структурообразования. Однако продолжительность структурообразования при этом возрастает. Указанное свидетельствует о том, что соли-ускорители эффективны на начальном его этапе. То есть сульфат-ионы, образующиеся при диссоциации сульфата лития, взаимодействуют с ионами кальция, образующимися при гидратации трехкальциевого силиката. Образующийся сульфат кальция выполняет функцию зародышей для кристаллизации продуктов гидратации, а также способствует формированию первичного этtringита. Наномодификатор на основе гидросиликатов цинка также способен инициировать образование гидросиликатов кальция, близких по составу и свойствам к тем, которые возникают при гидратации портландцемента [12]. Таким образом, соли, содержащие анионы, способные связывать катионы кальция в нерастворимые соединения, позволяют ускорить начальное структурообразование. Однако при этом длительность структурообразования увеличивается более чем в два раза. В ряде случаев наблюдается уменьшение количества этапов структурообразования, а их продолжительность существенно возрастает. Причём длительными становятся 2-й и 3-й этапы

структурообразования при укороченном первом этапе. Указанное может свидетельствовать о формировании оболочки из гидроксида меди после связывания ионов кальция в нерастворимый сульфат или карбонат.

При использовании наномодификатора для регулирования структурообразования цементного камня наблюдается как увеличение, так и уменьшение продолжительности протекания первого этапа структурообразования. Так, существенное увеличение продолжительности первого этапа наблюдается при использовании наномодификаторов с высоким силикатным модулем и концентрацией. В этом случае наномодификатор выполняет функцию замедлителя сроков схватывания [13] и усиливает действие гидросиликатов меди. Совместное использование наномодификатора (состав №3) и сульфата лития позволяет существенно ускорить начало схватывания при высоких концентрациях соли лития. Продолжительность структурообразования при этом существенно не изменяется. Таким образом, вводимые ускорители эффективны на начальном этапе – в сравнении с композиционным вяжущим происходит сокращение продолжительности первого этапа.

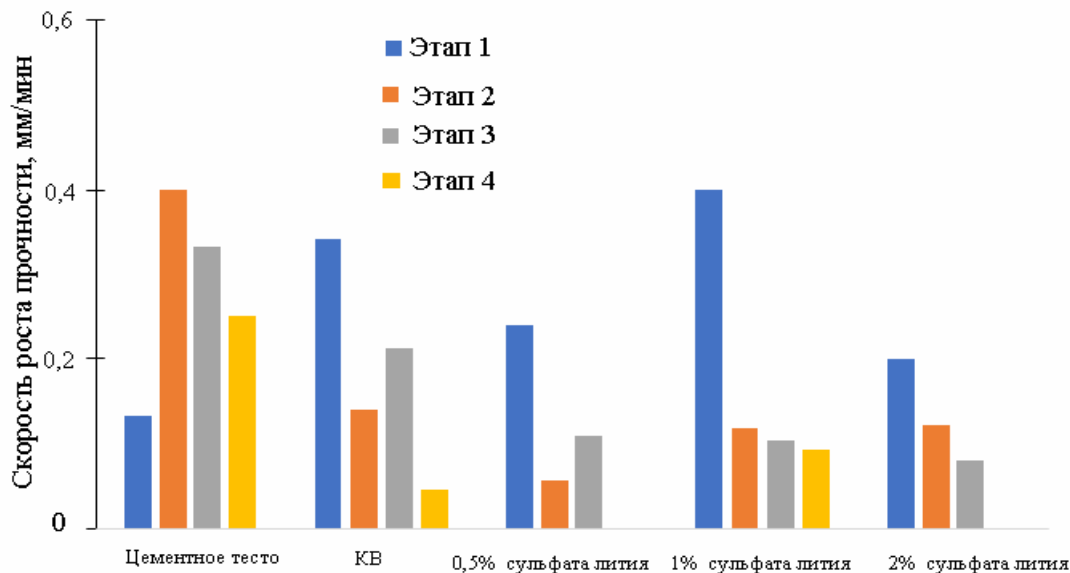
Также из табл. 2 следует, что скорость роста сопротивления проникновению иглы Вика в объём цементного теста в начальный период невелика в отличие от композиционного цементного теста, что может быть обусловлено влиянием силикатной фазы, содержащейся в гидросиликатах бария [14]. Однако при использовании гидросиликатов меди скорость роста сопротивления на втором этапе снижается и дальнейшего увеличения этого показателя не происходит. После формирования плёнки из гидроксида меди скорость роста прочности существенно снижается и не увеличивается в дальнейшем (рис. 2, а – 4, а). Таким образом, наблюдается изменение характера структурообразования композита. При использовании ускорителей схватывания необходимо обеспечить экстремальный характер твердения, свойственный для цементного теста (рис. 2, а). Однако важным является сохранение не только характера структурообразования композиционного цементного теста, но и величины скорости роста сил сопротивления (начальной прочности). Поэтому были рассчитаны относительные отклонения скорости роста прочности на каждом этапе структурообразования (рис. 2, б – 4, б) в сравнении со скоростью набора прочности цементным тестом. Анализ рис. 2, б показывает, что скорости роста прочности композиционного цементного теста, в том числе в присутствии солей-ускорителей схватывания, существенно отличаются на всех этапах схватывания.

Введение наномодификатора изменяет скорость роста прочности противоположным образом, что может быть связано с силикатным модулем и концентрацией раствора наномодификатора [13, 15, 16]. Анализ рис. 3 показывает, что применение наномодификатора состава №4 существенно ускоряет начальный этап роста прочности, наномодификаторы составов №№5 и 6 на 2-м и 3-м этапах позволяют ускорить рост прочности, при этом скорость роста прочности достигает значения 0,4 мм/мин (наномодификатор состава №5), характерного для цементного теста. Следует отметить, что при силикатном модуле гидросиликатов цинка 4,70 и концентрации раствора 0,047 % на начальном этапе структурообразования отмечается высокая скорость процесса, при увеличении силикатного модуля до 7,84 и концентрации раствора до 0,073 % происходит снижение начальной скорости структурообразования, в результате чего относительное отклонение скорости роста прочности составляет 5 %, также скорости 3-го и 4-го этапов структурообразования приближены к значениям, полученным для цементного теста. Суммарное значение относительного отклонения также минимально при использовании наномодификатора состава №5. Таким образом, применение наномодификатора №5 позволяет обеспечить характер изменения скорости роста прочности материала, присущей цементным системам.

Применение солей-ускорителей схватывания в наномодифицированных составах (наномодификатор состава №3) показывает, что характер изменения скоростей роста начальной прочности также изменяется и соответствует присущим для цементного теста. Анализ рис. 4, а показывает, что скорость роста начальной прочности возрастает

на 3-м этапе структурообразования, однако величина скорости ниже, чем для цементного камня.

а



б

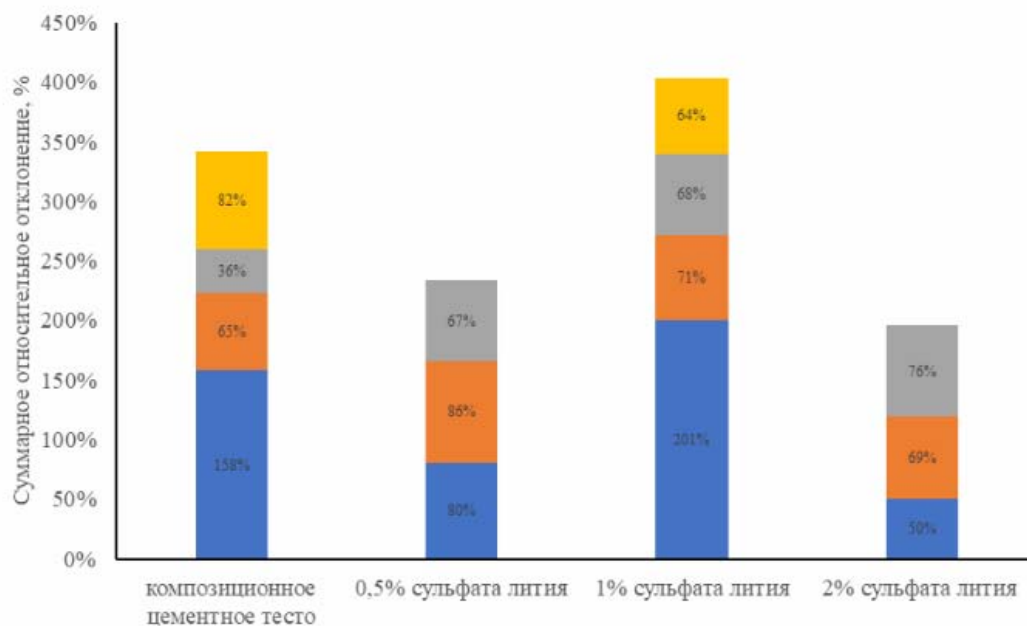
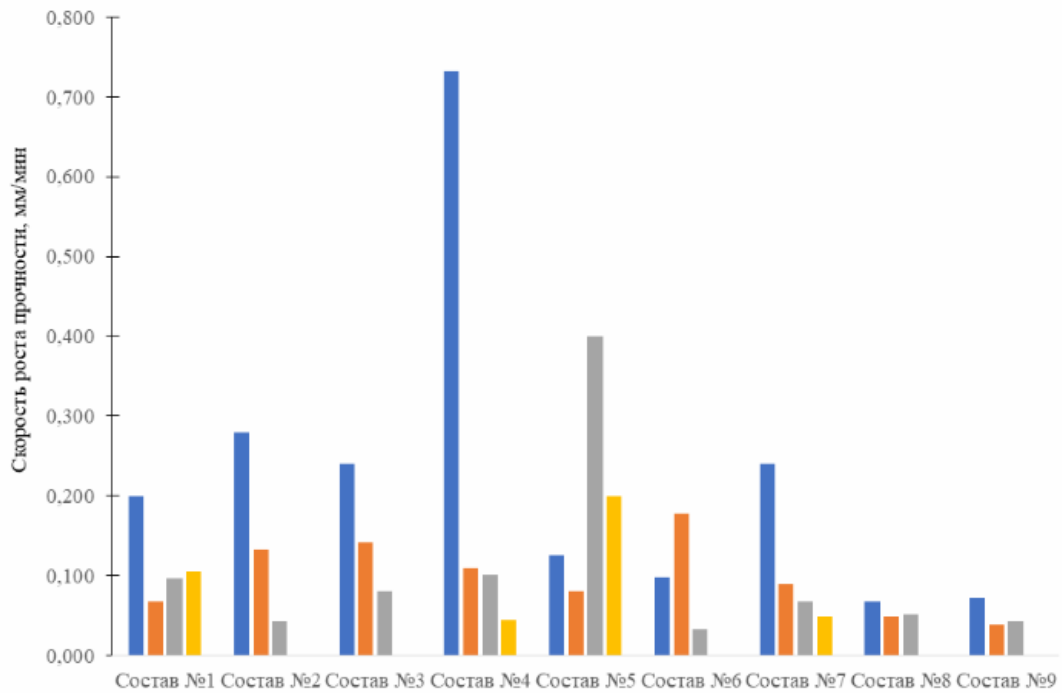


Рис. 2. Кинетика скорости роста начальной прочности материала (а) и ее сопоставление со скоростью структурообразования цементного и композиционного цементного теста (б):

КВ – композиционное цементное тесто, а также композиционное цементное тесто, содержащее ускорители схватывания

а



б

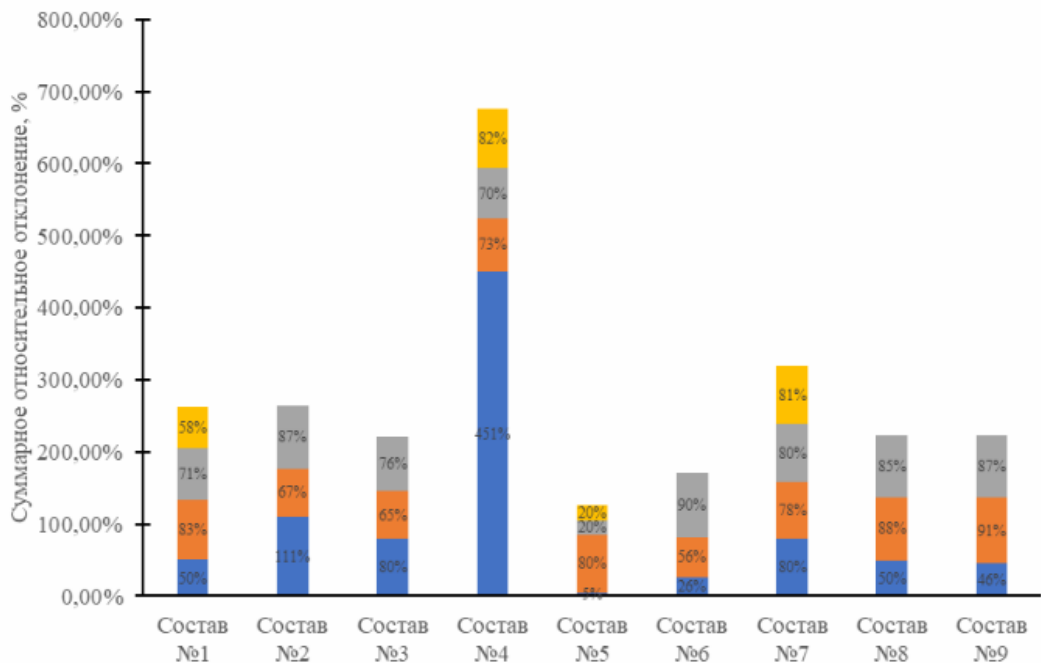
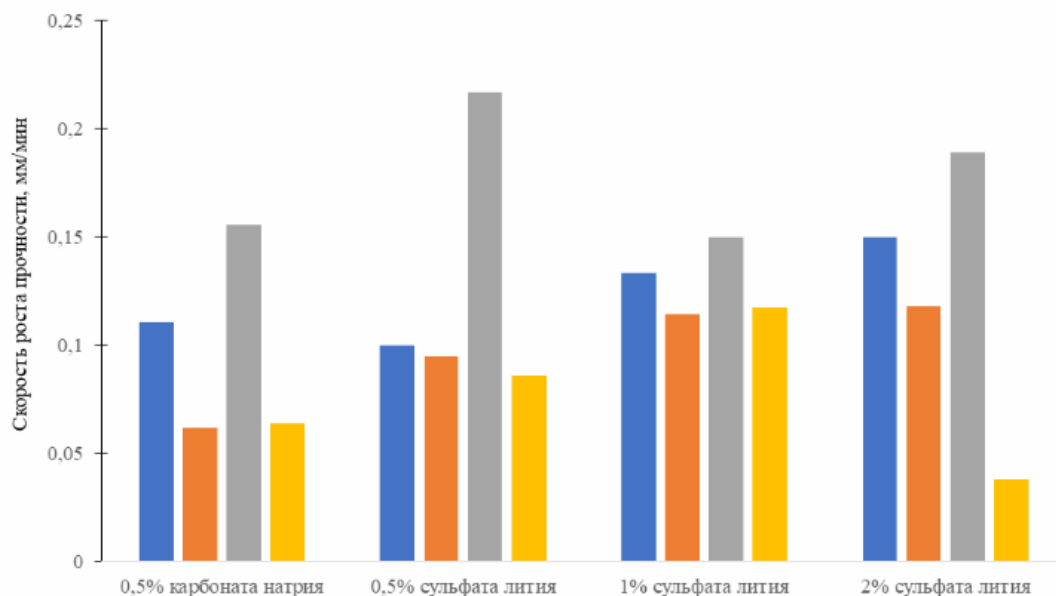


Рис. 3. Кинетика изменения скорости роста начальной прочности наномодифицированного композиционного цементного теста и ее сопоставление со скоростью структурообразования композиционного цементного теста:

- 1 – композиционное цементное тесто содержит наномодификатор состава №1 (табл. 1);
 2 – то же, состав №2; 3 – то же, состав №3; 4 – то же, состав №4; 5 – то же, состав №5;
 6 – то же, состав №6; 7 – то же, состав №7; 8 – то же, состав №8; 9 – то же, состав №9

а



б

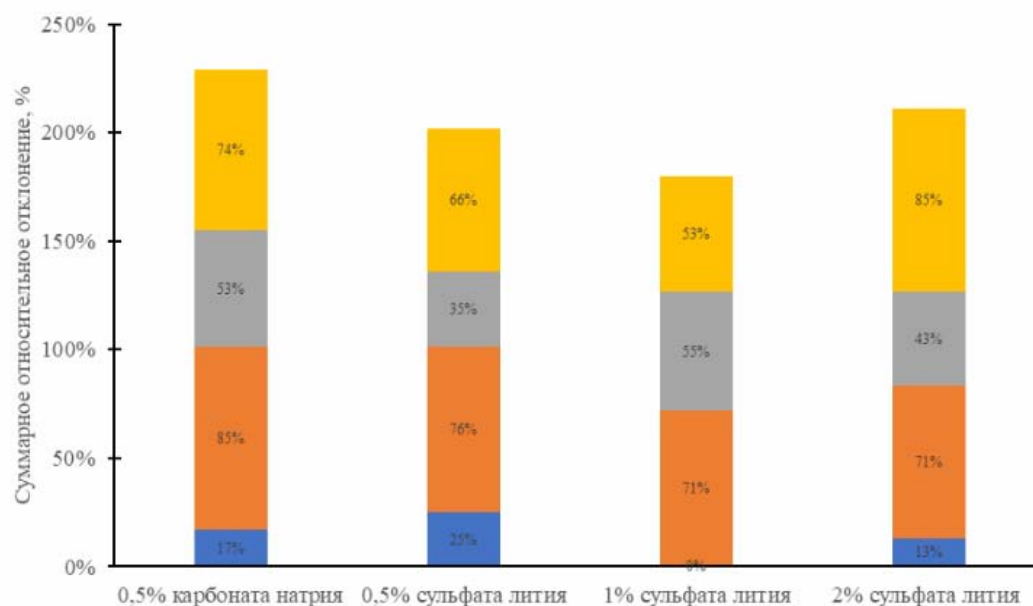


Рис. 4. Кинетика изменения скорости роста начальной прочности и ее сопоставление со скоростью структурообразования наномодифицированного композиционного теста цементного теста (наномодификатор состава №3), содержащего соли-ускорители схватывания

Выводы

Применение солей-ускорителей сроков схватывания и/или наномодификаторов позволяет ускорить наступление начала схватывания композиционного цементного вяжущего, содержащего гидросиликаты бария и меди, однако их применение увеличивает длительность структурообразования. При этом возможно сокращение количества этапов структурообразования до 3, но продолжительность второго и третьего этапов существенно увеличивается. Введение солей-ускорителей сроков схватывания и/или наномодификаторов изменяет скорость роста начальной прочности материала: происходит увеличение скорости на первом этапе и ее снижение на последующих этапах. Однако применение наномодификатора состава №5 позволяет восстановить кинетику изменения скорости роста начальной прочности, характерную для порт-

ландцемента. Указанное свидетельствует об изменении характеристик плёнки гидроксида меди на поверхности зёрен минералов портландцемента. Указанное наблюдается и при совместном применении наномодификатора состава №3 и солей-ускорителей сроков схватывания. Однако скорость роста начальной прочности ниже, чем в цементном тесте. Относительная скорость набора начальной прочности наблюдается при применении наномодификатора на основе гидросиликатов цинка с силикатным модулем 7,84 и при концентрации раствора 0,073 %.

Таким образом, применение наномодификатора №5 позволяет снизить эффект замедления структурообразования, возникающего вследствие формирования плёнки гидроксида меди. Представляет также интерес исследование эффективности использования наномодификатора состава №5 совместно с карбонатом натрия и сульфатом лития.

Список литературы

1. Король, О.А. Многокритериальный анализ мероприятий при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов / О.А. Король, Г.С. Кузнецов // Недвижимость: экономика, управление. – 2017. – № 1. – С. 57–61.
2. Евсеев, Л.Д. Плесневый гриб – основной враг строительных конструкций // Л.Д. Евсеев, Л.Л. Негода, Т.В. Суздальцева // Жилищное строительство. – 2009. – № 11. – С. 7–9.
3. Маканина, О.А. Плесневые грибы как один из факторов снижения качества жизни современного человека / О.А. Маканина, Л.В. Гордеева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2013. – № 10 (153). – С. 112–115.
4. Буркутбаева, Т.Н. Диагностика, лечение микозов лор-органов, вызванных плесневыми грибами / Т.Н. Буркутбаева, Л.И. Фохридина, Л.К. Таапанбекова // Успехи медицинской микологии. – 2004. – Т. 4. – С. 211–212.
5. Носова, Т.Н. Проживание в помещениях, пораженных плесневыми грибами, – фактор риска развития микогенной сенсibilизации и инфицирования при бронхиальной астме / Т.Н. Носова, О.Ф. Коложкина, Т.А. Бажукова, Л.И. Ведрова // Проблемы медицинской микологии. – 2003. – Т. 5, № 3. – С. 20–22.
6. Grishina, A.N. Hydration of cement in the presence of biocidal modifiers based on metal hydrosilicates / A.N. Grishina, E.V. Korolev, V.A. Gladkikh // Materials. – 2022. – 15. – 292. – <https://doi.org/10.3390/ma15010292>
7. Тараканов, О.В. Химические добавки в растворы и бетоны / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с.
8. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Казанский Государственный архитектурно-строительный университет: Издательство «Палеотип», 2006. – 244 с.
9. Гришина, А.Н. Особенности химического состава гидросиликатов бария, полученных по различным технологиям / А.Н. Гришина, Е.В. Королёв // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 6 (95). – С. 83–91.
10. Гришина, А.Н. Наноразмерные биоцидные модификаторы на силикатной основе для вяжущих веществ / А.Н. Гришина, Е.В. Королёв // Сухие строительные смеси. – 2017. – № 5. – С. 41–44.
11. Бобрышев, А.Н. Явление самоорганизации в твердеющих цементных системах / А.Н. Бобрышев, Н.И. Макридин, В.И. Соломатов. – Пенза: ПДНТП, 1989. – 34 с.
12. Гришина, А.Н. Оценка эффективности модифицирования цементных материалов синтетическими нано- и микроразмерными частицами гидросиликатов цинка / А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 5–15.
13. Чернышов, Е.М. Управление реологическими и конструкционными свойствами цементного камня при наномодифицировании / Е.М. Чернышов, Г.С. Славчева, О.В. Артамонова // Нанотехнологии в строительстве. – 2016. – Т. 8, №6. – С. 87–101.
14. Гришина, А.Н. Раннее структурообразование цементного камня, модифицированного наноразмерными гидросиликатами бария / А.Н. Гришина, А.Б. Сатюков, Е.В. Королёв // Научное обозрение. – 2014. – № 7–1. – С. 134–139.

15. Артамонова, О.В. Эффективность применения комплексных наноразмерных добавок для цементных систем / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // Неорганические материалы. – 2017. – Т. 53, № 10. – С. 1105–1110.

16. Артамонова, О.В. Исследование количественного состава наноразмерных систем $\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, синтезированных золь-гель методом / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения и высокие технологии. – 2011. – № 3–4. – С. 13–21.

References

1. Korol, O.A. Multicriteria analysis of measures during major repairs of apartment buildings / O.A. Korol, G.S. Kuznetsov // Real estate: economics, management. – 2017. – No. 1. – P. 57–61.

2. Evseev, L.D. Mold fungus is the main enemy of building structures // L.D. Evseev, L.L. Negoda, T.V. Suzdaltseva // Housing construction. – 2009. – No. 11. – P. 7–9.

3. Makanina, O.A. Mold fungi as one of the factors reducing the quality of life of modern man / O.A. Makanina, L.V. Gordeeva // Scientific bulletin of Belgorod State University. Series: Natural sciences. – 2013. – No. 10 (153). – P. 112–115.

4. Burkutbaeva, T.N. Diagnostics and treatment of mycoses of ENT organs caused by mold fungi / T.N. Burkutbaeva, L.I. Fokhrida, L.K. Taapanbekova // Advances in Medical Mycology. – 2004. – V. 4. – P. 211–212.

5. Nosova, T.N. Living in premises affected by mold fungi is a risk factor for the development of mycogenic sensitization and infection in bronchial asthma / T.N. Nosova, O.F. Kolozhkina, T.A. Bazhukova, L.I. Vedrova // Problems of Medical Mycology. – 2003. – V. 5, No. 3. – P. 20–22.

6. Grishina, A.N. Hydration of cement in the presence of biocidal modifiers based on metal hydrosilicates / A.N. Grishina, E.V. Korolev, V.A. Gladkikh // Materials. – 2022. – 15. – 292. – <https://doi.org/10.3390/ma15010292>

7. Tarakanov, O.V. Chemical additives in solutions and concrete / O.V. Tarakanov. – Penza: PSUAS, 2016. – 156 p.

8. Izotov, V.S. Chemical additives for modification of concrete / V.S. Izotov, Yu.A. Sokolova. – M.: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering: Publishing House «Paleotip», 2006. – 244 p.

9. Grishina, A.N. Features of the chemical composition of barium hydrosilicates obtained by various technologies / A.N. Grishina, E.V. Korolev // Bulletin of civil engineers. – 2022. – No. 6 (95). – P. 83–91.

10. Grishina, A.N. Nanosized biocidal modifiers on a silicate basis for binders / A.N. Grishina, E.V. Korolev // Dry building mixtures. – 2017. – No. 5. – P. 41–44.

11. Bobryshev, A.N. The phenomenon of self-organization in hardening cement systems / A.N. Bobryshev, N.I. Makridin, V.I. Solomatov. – Penza: PDNTP, 1989. – 34 p.

12. Grishina, A.N. Evaluation of the efficiency of modifying cement materials with synthetic nano- and micro-sized particles of zinc hydrosilicates / A.N. Grishina // Regional architecture and construction. – 2022. – No. 3 (52). – P. 5–15.

13. Chernyshov, E.M. Control of rheological and structural properties of cement stone during nanomodification / E.M. Chernyshov, G.S. Slavcheva, O.V. Artamonova // Nanotechnology in construction. – 2016. – Vol. 8, No. 6. – P. 87–101.

14. Grishina, A.N. Early structuring of cement stone modified with nanosized barium hydrosilicates / A.N. Grishina, A.B. Satyukov, E.V. Korolev // Scientific review. – 2014. – No. 7-1. – P. 134–139.

15. Artamonova, O.V. Efficiency of using complex nanosized additives for cement systems / O.V. Artamonova, G.S. Slavcheva, E.M. Chernyshov // Inorganic materials. – 2017. – Vol. 53, No. 10. – P. 1105–1110.

16. Artamonova, O.V. Study of the quantitative composition of nanosized $\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ systems synthesized by the sol-gel method / O.V. Artamonova, O.R. Sergutkina // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physicochemical Problems of Construction Materials Science and High Technologies. – 2011. – No. 3–4. – P. 13–21.

УДК 691.537

DOI 10.54734/20722958_2024_4_17

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

Гаврилов Михаил Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Начертательная геометрия
и графика»

E-mail: gavrilo79@inbox.ru

*Московский государственный
строительный университет*

Россия, 129337, Центральный федеральный
округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,
тел. +7 (495) 781-80-07;
факс +7 (495) 781-80-07

Ерофеев Владимир Трофимович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Строительное
материаловедение»

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Gavrilov Mikhail Aleksandrovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Descriptive Geometry
and Graphics»

E-mail: gavrilo79@inbox.ru

Moscow State University of Civil Engineering

Russia, 129337, Moscow, 26,
Yaroslavskoye shosse,
tel.: +7(495) 583-73-81;
fax: +7(495) 582-59-67

Erofeev Vladimir Trofimovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Construction Materials Science»

БИОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

М.А. Гаврилов, В.Т. Ерофеев

Приведены результаты исследования биостойкости эпоксидных композитов с применением биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень» и наполнителей различной природы. Исследовано влияние добавки и наполнителей на реологические свойства модифицированных составов. Изучены эксплуатационные показатели отвержденных составов модифицированных композитов. Выявлено определяющее влияние модифицирующих добавок и наполнителей на прочностные и деформативные свойства композитов. Установлено положительное влияние биоцидной добавки «Тефлекс» на биосопротивление эпоксидных композитов. Доказано положительное влияние добавки «Тефлекс Антиплесень» на их упругопрочностные и эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: биостойкость, прочность, деформативные свойства, защитные свойства, эпоксидный композит

BIOSTABILITY OF MODIFIED EPOXY COMPOSITES

М.А. Gavrilov, V.T. Erofeev

The article provides the results of researching biological stability of epoxy composites utilizing biocide additive “Teflex Anti-mold” as well as fillers of various types. The influence of an additive and fillers on the rheological properties of modified compositions has been researched. Exploitation values of hardened compositions of modified epoxy composites have been determined. Directional influence of modifying additives and fillers on strength and deformative properties of composites have been pointed out. A positive influence of “Teflex” biocide additive on the biostability of epoxy composites has been determined. A positive influence of “Teflex” additive on strength, rigidity and exploitation properties has been proven.

Keywords: biostability, durability, deformative properties, protective properties, epoxy composite

В настоящее время в антикоррозионной технике применяются эпоксидные связующие, которые используются для изготовления клеев, лакокрасочных материалов, мастичных составов, полимербетонов [1, 2, 3]. Широкое применение данных материалов в строительстве объясняется комплексом благоприятных свойств, таких, как

повышенные показатели прочности, химической стойкости в различных агрессивных средах, пониженная усадка и т.д. В связи с развитием биотехнологических производств возникает проблема повышения биостойкости строительных материалов, используемых для антикоррозионной защиты. Поэтому важной задачей является создание эпоксидных композитов повышенной биостойкости, исключающих заселение поверхностей материалов микроорганизмами и тем самым способствующих увеличению долговечности строительных конструкций и улучшению экологической ситуации в зданиях и сооружениях.

Один из способов повышения биостойкости полимерных материалов – введение в их составы фунгицидных добавок [3, 4, 5]. Рассмотрены составы на эпоксидной смоле марки ЭД-16, в которых в качестве отвердителя использован ПЭПА. Модификатором, способствующим улучшению технологических свойств эпоксидных полимербетонов, служила каменноугольная смола. С учетом того что полимерные композиты можно составить, используя различные наполнители, применялись порошки известняка, кварца, стеклобоя, кирпича глиняного обыкновенного. Фунгицидной добавкой служил препарат «Тефлекс Антиплесень». Исследуемые составы и результаты их испытаний приведены в табл. 1 и на рис. 1. Достигнуто значительное повышение биологической стойкости эпоксидных композитов. Удалось добиться проявления фунгицидных свойств у составов с названными наполнителями при введении 10 мас. ч. добавки «Тефлекс Антиплесень». В то же время экспериментальные данные свидетельствуют о том, что эпоксидные композиты, не подвергнутые специальной защите от биоповреждений, вследствие поражения микроорганизмами могут частично или полностью терять свое функциональное назначение, что недопустимо в условиях их нормальной эксплуатации.

Т а б л и ц а 1

Составы эпоксидных композитов с добавкой «Тефлекс Антиплесень»

Компонент	Содержание компонентов в составах, мас. ч.														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ЭД-16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ПЭПА	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Каменноугольная смола	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
«Тефлекс»	2	5	10	2	5	10	2	5	10	2	5	10	2	5	10
Порошок: кварца	100	100	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
боя стекла	—	—	—	100	100	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
известняка	—	—	—	—	—	—	100	100	100	—	—	—	—	—	—
глиняного кирпича	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	100	100	—	—	—

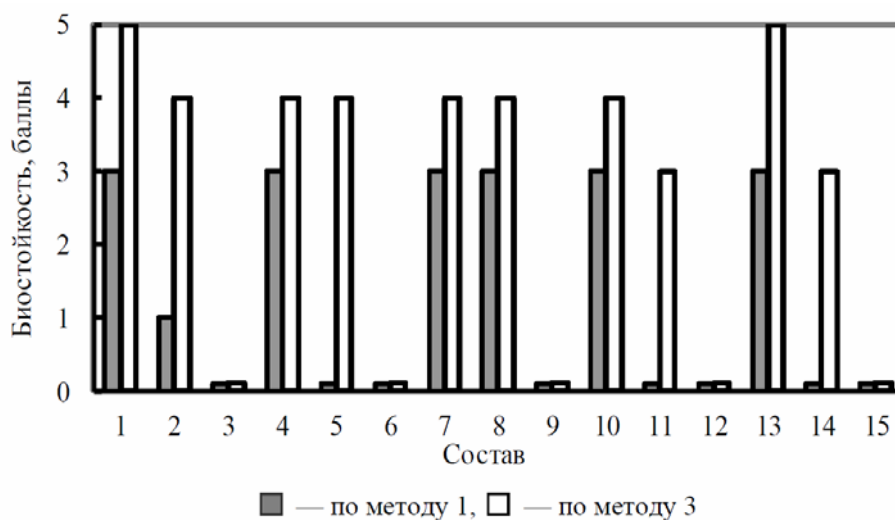


Рис. 1. Биостойкость эпоксидных композитов с добавкой

Степень разрушающего воздействия микроорганизмов определяется физическими, химическими, биологическими и другими факторами. Наиболее интенсивное поражение происходит при повышенной влажности, высоких температурах и загрязнении окружающей среды. При жизнедеятельности микроорганизмы выделяют органические и неорганические кислоты, воду и другие ферменты, которые оказывают разрушающее воздействие. Это чаще всего происходит в зданиях, где имеются технологические среды, служащие питательной средой для микроорганизмов. Заселяясь на загрязнениях, они выделяют продукты метаболизма. Согласно данным [3], эту среду можно моделировать водным раствором лимонной кислоты и перекиси водорода.

Актуально изучение биологической коррозии композитов в данных средах. Нами исследована биологическая стойкость эпоксидно-каменноугольных композитов в зависимости от вида наполнителя (табл. 2). Испытания проводили на образцах в виде призм размером 1×1×3 см. Задачу решали путем реализации матрицы в виде плана Коно. Цель исследований состояла в установлении наиболее агрессивной среды и разработке стойких составов. Варьируемыми факторами по матрице были содержание лимонной кислоты (0,1–10,0 %) и перекиси водорода (0,03–3,0 %) в водном растворе. Результаты испытаний после 180 сут выдерживания в агрессивной среде приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 2

Составы композитов для испытания на биологическое сопротивление

Компонент	Содержание компонентов в составах, мас. ч.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЭД-16	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ПЭПА	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Каменноугольная смола	–	5	5	5	5	5	5	5	5
Кварцевый песок	100	100	50	–	–	–	–	–	–
Стеклобой	–	–	–	100	–	–	–	–	–
Известняк	–	–	–	–	100	–	–	–	–
Мрамор	–	–	50	–	–	100	–	–	–
Кирпичный бой	–	–	–	–	–	–	100	–	–
Портландцемент	–	–	–	–	–	–	–	100	–

Т а б л и ц а 3

Физико-технические показатели эпоксидно-каменноугольных композитов в биологических агрессивных средах

Номер состава	Номер среды	Максимальное значение		Номер среды	Минимальное значение	
		Прочность при сжатии, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа		Прочность при сжатии, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа
1	3	70,8	24,2	1	45,6	15,0
2	2	70,2	19,3	5	55,9	19,2
3	7	65,1	24,4	1	47,8	11,8
4	7	45,7	13,6	3	35,3	13,3
5	7	73,5	15,9	9	62,9	23,3
6	2	67,1	18,9	1	43,5	17,6
7	1	67,6	20,3	2	57,7	20,8
8	7	75,7	26,5	5	62,4	30,4
9	7	56,4	9,86	8	28,8	13,8

Из результатов исследований следует, что наиболее агрессивны среды № 1 (содержание лимонной кислоты – 1 %, перекиси водорода – 0,3 %) и № 8 (содержание лимонной кислоты – 0,1 %, перекиси водорода – 0,3 %).

Таким образом, экспериментальными исследованиями подтверждены биоцидные свойства добавки «Тефлекс Антиплесень» и установлена возможность придания строительным материалам на основе органических и неорганических связующих устойчивости к воздействию мицелиальных грибов в условиях реальной эксплуатации.

Установлено положительное влияние биоцидной добавки «Тефлекс» на биосопротивление эпоксидных композитов. Важно добиться того, чтобы введение добавки не вызывало ухудшения других свойств. С точки зрения рассмотрения полимербетонов, используемых для изготовления защитных покрытий или других химически стойких изделий, эти материалы должны обладать высокими прочностными свойствами, малой проницаемостью и высокой химической стойкостью в агрессивных средах. В наших исследованиях в качестве контролируемых показателей полимерных композитов рассмотрены: прочность при сжатии и растяжении при изгибе, модуль упругости, проницаемость, коэффициент химической стойкости.

Уделено также внимание установлению влияния добавки на вязкость полимерных композиций. Для исследований взято 10 составов с различным содержанием биоцидной добавки. При этом рассмотрены наполненные и ненаполненные составы (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Составы для исследований

Компонент	Содержание вещества в составах, мас. ч.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эпоксидная смола	100	100	99	99	97	97	94	94	90	90
ПЭПА	10	10	9,9	9,9	9,7	9,7	9,4	9,4	9,0	9,0
Кварцевый порошок	–	300		300		300	–	300	–	300
Тефлекс Антиплесень	–	–	1,0	1,0	3,0	3,0	6,0	6,0	10	10

На *первом* этапе исследований устанавливалось изменение вязкости эпоксидных композиций от содержания биоцидной добавки, поскольку это одно из главных их технологических свойств. Во время производства работ применяются различные способы их нанесения на защищаемую поверхность, при этом важным свойством является подвижность составов, что необходимо при использовании средств механизации: краскораспылительных установок, окрасочных агрегатов высокого давления и т.д. Полимерная композиция должна заполнить трещины, раковины и т.д.

На рис. 2 приведены графики изменения вязкости наполненных и ненаполненных композиций. Данные показатели определены с помощью вискозиметров типа ВП-3 и ВЗ-4 соответственно. Из графиков следует, что введение биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень» способствует снижению вязкости эпоксидных композиций при сохранении количественного содержания жидкой фазы.

На *втором* этапе исследованы свойства затвердевших эпоксидных составов с добавкой. На рис. 3–5 показано изменение прочности при сжатии ($R_{сж}$), на растяжение при изгибе ($R_{и}$), модуля упругости (E), водопоглощения по массе (W) и коэффициента водостойкости ($K_{в.с}$) исследуемых составов.

Из графических зависимостей (см. рис. 3) видно положительное влияние биоцидной добавки на различные физико-технические свойства эпоксидных композитов. Наблюдаются повышение прочности составов, содержащих добавку в количестве 3–5 мас. ч., при сжатии – на 5–8 %, на растяжение при изгибе – на 10–17 %, снижение модуля упругости – до 40 %. Повышение прочности материалов с добавками, видимо, обусловлено снижением их хрупкости.

При исследовании коррозионной стойкости композитов в качестве агрессивной среды рассмотрена вода, нагретая до 80 °С. Это обусловлено тем, что вода – универсальная агрессивная среда для полимербетонов, а также тем, что очень часто на различные покрытия воздействуют агрессивные среды с повышенной температурой (на-

пример моющие средства, используемые при мытье покрытий полов, и т.д.). На рис. 4, 5 приведены зависимости изменения водопоглощения и коэффициента водостойкости эпоксидных композитов наполненных и ненаполненных составов. Введение биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень» способствует снижению водопоглощения и повышению водостойкости обоих составов. Очевидно, это объясняется тем, что возрастает гидролитическая устойчивость полимерной сетки и улучшается адгезионное взаимодействие между полимерным вяжущим и наполнителем.

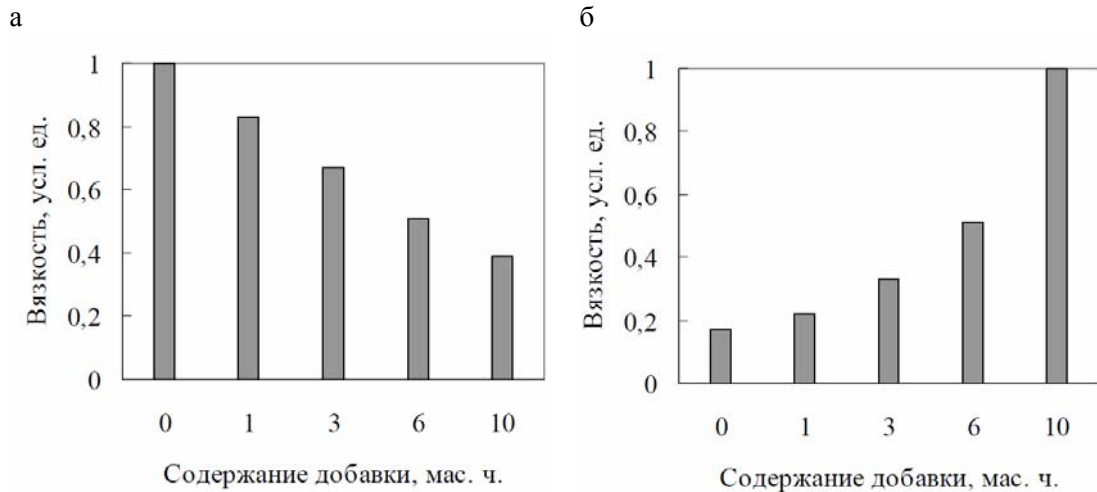


Рис. 2. Зависимость изменения вязкости ненаполненных (а) и наполненных (б) эпоксидных композиций от содержания биоцидной добавки

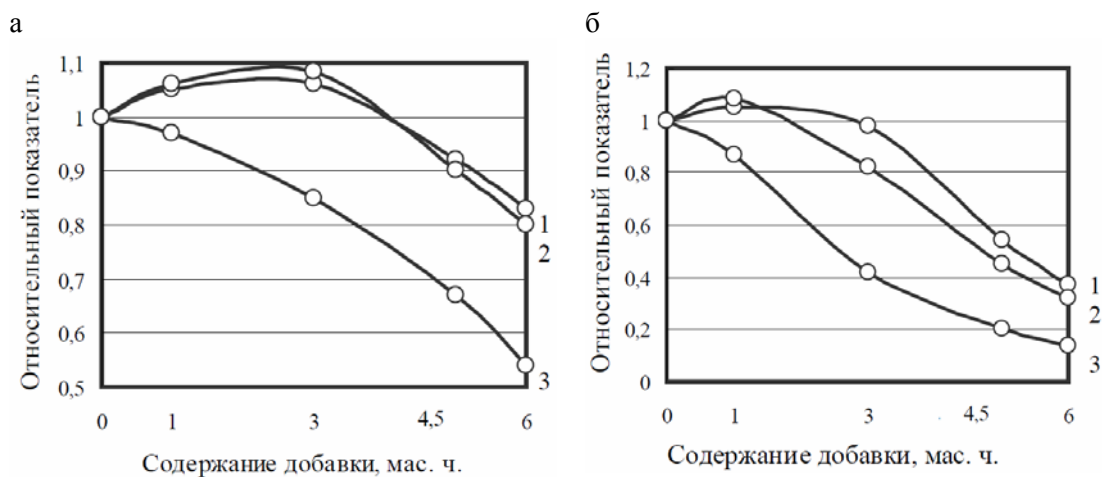


Рис. 3. Зависимость изменения относительных показателей прочности и модуля упругости ненаполненных (а) и наполненных (б) эпоксидных композитов от содержания биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень»:
1 – прочность при сжатии; 2 – прочность на растяжение при изгибе; 3 – модуль упругости

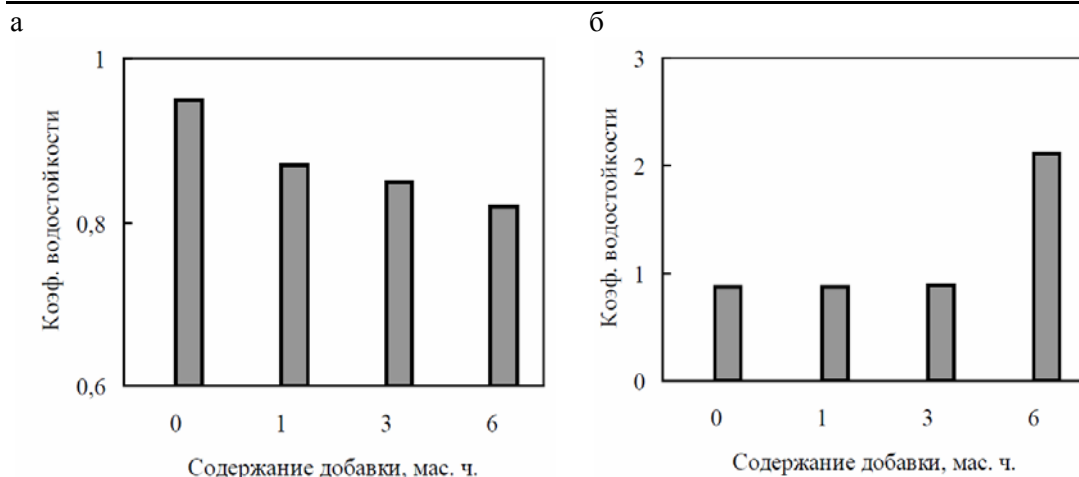


Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента водостойкости ненаполненных (а) и наполненных (б) эпоксидных композиций после 9 ч выдерживания образцов в воде при температуре 80 °С от содержания биоцидной добавки

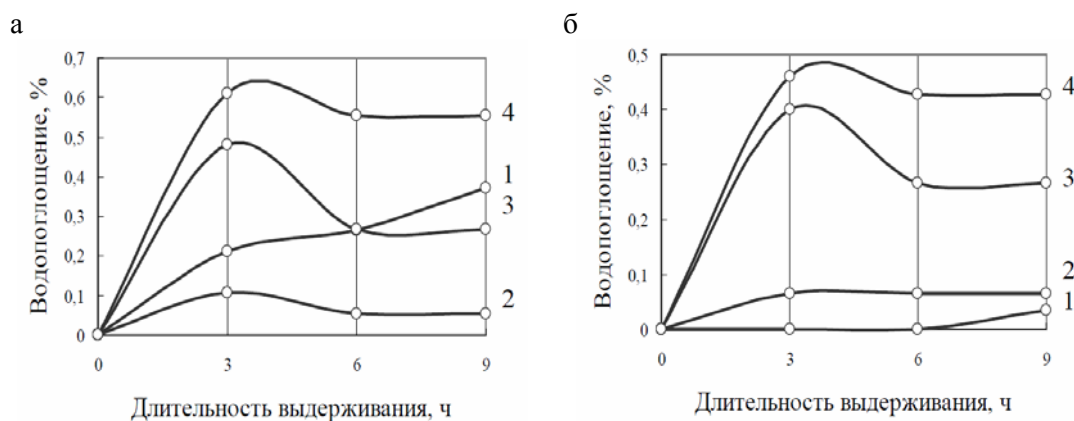


Рис. 5. Зависимость изменения водопоглощения ненаполненных (а) и наполненных (б) эпоксидных композиций после выдерживания образцов в воде при температуре 80 °С от содержания добавки:
1 – контрольные составы без добавки; 2 – составы, содержащие 1 % добавки «Тефлекс Антиплесень»; 3 – то же, 3 %; 4 – то же, 6 %; 5 – то же, 10 %

Таким образом, доказано положительное влияние добавки «Тефлекс Антиплесень» не только на повышение биостойкости эпоксидных композитов, но и на улучшение их упругопрочностных и эксплуатационных свойств.

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями подтверждены биоцидные свойства добавки «Тефлекс Антиплесень» и установлена возможность придания строительным материалам на основе органических и неорганических связующих устойчивости к воздействию мицелиальных грибов в условиях реальной эксплуатации.

2. Установлено, что введение биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень» способствует снижению вязкости эпоксидных композиций при сохранении количественного содержания жидкой фазы.

3. Введение биоцидной добавки «Тефлекс Антиплесень» способствует снижению водопоглощения и повышению водостойкости модифицированных эпоксидных композитов.

Список литературы

1. Будылина, Е.А. Формирование свойств композитов: от эмпирического подхода к фундаментализации / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №1. – С. 33–39.
2. Гарькина, И.А. Опыт проектирования композитов: ретроспективный анализ / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №2. – С. 22–29.
3. Гаврилов, Г.Н. Технология изготовления композиционных материалов методами литья, проката и прессования / Г.Н. Гаврилов, В.А. Хренов, В.Т. Ерофеев, М.А. Гаврилов. – Саранск, 2020. – 232 с.
4. Ерофеев, В.Т. Разработка и исследование цементных и полимерных композитов для ремонта мостового сооружения / В.Т. Ерофеев, Б.А. Бондарев, В.М. Круглов, М.А. Гаврилов // Транспортные сооружения. – 2021. – Т.8, №2.
5. Гаврилов, М.А. Прочностные свойства модифицированных эпоксидных композитов / М.А. Гаврилов, Д.М. Гаврилова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2022. – №4 (41). – С. 188–196.

References

1. Budylna, E.A. Formation of Properties of Composites: From Empirical Approach To Fundamentalization / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – Issue 1. – P. 33–39.
2. Garkina, I.A. Experience of Designing of Composites: Retrospective Analysis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – Issue 2. – P. 22–29.
3. Gavrilov, G.N. Technology of Production of Composite Materials by Means of Molding, Rolling and Pressing / G.N. Gavrilov, V.A. Hrenov, V.T. Erofeev, M.A. Gavrilov. – Saransk, 2020. – 232 p.
4. Erofeev, V.T. Research and Evaluation of Cement and Polymer Based Compositions for Bridge Structural Maintenance / V.T. Erofeev, B.A. Bondarev, V.M. Kruglov, M.A. Gavrilov // Transport Infrastructure. – 2021. – Vol. 8, Issue 2.
5. Gavrilov, M.A. Rigidity Properties of Modified Epoxy Composites / M.A. Gavrilov, D.M. Gavrilova // PGUAS Herald: Construction, Science and Education. – 2022. – Issue 4 (41). – P.188–196.

УДК 69:001.8

DOI 10.54734/20722958_2024_4_24

Московский политехнический университет
Россия, 107023, г. Москва,
ул. Б.Семёновская, д. 38

Будылина Евгения Александровна,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Инфокогнитивные
технологии»

E-mail: bud-ea@yandex.ru

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

Данилов Александр Максимович,
доктор технических наук,
профессор, советник РААСН,
главный редактор РИО
E-mail: fmatem@pguas.ru

Moscow Polytechnic University

Russia, 107023, Moscow,
38, B.Semenovskaya St.

Budylna Eugenia Aleksandrovna,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor of the
Department «Infocognitive technologies»
E-mail: bud-ea@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

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

Danilov Aleksander Maksimovich,
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the
Russian Academy of Architectural and
Construction Sciences, editor-in-chief of the
editorial and publishing department
E-mail: fmatem@pguas.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАДИГМЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Рассматривается идентификационный подход к синтезу материалов: ментальные представления об идентификации; установки и мотивы процесса отображения ментальных представлений об идентификации в предмет теоретического идентификационного исследования; нормы, образцы и идеалы теоретического исследования проблем идентификации. Отмечается, что наличие модели субъекта создает лишь потенциальную возможность построения адекватной схемы идентификации в целом. Предлагается рациональная схема идентификации строительных материалов с позиций современных парадигм.

Ключевые слова: строительные материалы, сложные системы, идентификация, рациональная схема, парадигма, синтез

IDENTIFICATION AND MODERN PARADIGMS IN MATERIALS SCIENCE

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

The article considers a identification approach to the synthesis of materials: mental representations of identification; attitudes and motives of the process of displaying mental representations of identification in the subject of theoretical identification research; norms, samples and ideals of theoretical research of identification problems. It is noted that the presence of a subject model creates only a potential opportunity to construct an adequate identification scheme as a whole. A rational scheme for the identification of building materials from the standpoint of modern paradigms is proposed.

Keywords: building materials, complex systems, identification, rational scheme, paradigm, synthesis

До настоящего времени идентификационный подход еще не оформился в публичную научно-исследовательскую программу из-за крайней неразвитости в эталонных работах представлений об идентификации как об особом типе человеческой деятельности, доминировании математического уровня строгости и идеи о математическом языке как наилучшем средстве представления и развития идентификационных знаний. Такой подход содержит: ментальные представления об идентификации; установки и мотивы процесса отображения ментальных представлений об идентификации в предмет теоретического идентификационного исследования; нормы, образцы и идеалы теоретического исследования проблем идентификации. Основное внимание в работах направлено на постановку и исследование математических задач идентификации; при этом практически не затрагиваются содержательные, человеческие аспекты практической идентификации: в дисциплине отсутствуют соответствующие проблеме построения детальной общей схемы методы и образцы желательной научной деятельности, необходимая система научных понятий [1...6].

В аппарате теории идентификации не хватает понятий, отражающих руководящую и целеобразующую роль человека в процессах идентификации: не изучая человеческие аспекты идентификации, мы тем самым существенно затрудняем или даже делаем практически невозможным построение детальных общих схем идентификации, понятных не только исследователям, но и субъектам идентификации. Отсутствие исследований по человеческим аспектам практической идентификации – показатель существенных интеллектуальных трудностей, возникающих уже на этапе разработки плана научной работы: в рамках исследований необходимо научно объяснить, как происходит процесс познания действительности при создании реальных автоматических систем, и разработать на основе этого объяснения новые средства идентификации для ускорения процесса познания. *Наличие модели субъекта создает лишь потенциальную возможность построения адекватной схемы идентификации в целом.* Ее реализация связана в первую очередь с созданием *общей схемы рациональной идентификации*; схема должна содержать набор четко выделенных гипотез, с помощью которых можно объяснить наблюдаемые особенности идентификационного подхода. Исследование человеческих аспектов идентификации желательно направить в первую очередь на выяснение ролей и функций человека в процессе идентификации. Полученные результаты легче понять и оценить, если построить на их основе фрагмент общей схемы. И, наоборот, разработать понятный фрагмент общей схемы можно только для деятельности, относительно которой имеется объяснение ее рациональной компоненты. Иными словами, построение общей схемы и исследование человеческих аспектов идентификации – это взаимосвязанные темы. *В процессе идентификации технической системы осознаются как особо важные: какими свойствами обладает техническая система; для каких аспектов технической системы необходимо построить адекватную модель; элементами какой системы процессов является идентификация; каким требованиям должна удовлетворять адекватная модель.* Здесь и далее предполагается, что идентификация не может осуществляться без использования присущих только человеку способностей, не бывает автоматической идентификации, ни один алгоритмический процесс не может быть назван *идентификацией (особый тип человеческой деятельности, направленный на экспериментальное изучение действительности и построение на основе этого изучения всех моделей, необходимых с точки зрения субъекта идентификации для отыскания решения практической или познавательной проблемы).*

Общая схема не содержит многие аспекты основного идентификационного подхода: как идентификация взаимодействует с другими процессами создания желательной сложной системы, под влиянием каких управляющих воздействий изменяются ее процессы, не выделены источники этих воздействий; не изложено, как субъект идентификации должен действовать в ходе реализации каждой установки общей схемы; основной идентификационный подход как научное направ-

ление значительно шире, чем методология организации рациональной идентификации. Он нормирует не только познавательную-практическую деятельность субъекта, но и формы представления этой деятельности в научных публикациях. Иными словами, *основной идентификационный подход* – еще и определенная *методология научного исследования*. Данный аспект также не отражен в разработанной схеме. Поэтому изложенный *вариант общей схемы* – это не более чем явно *сформулированная идея организации рациональной идентификации*. Содержание ее основных результатов должно быть понятно субъекту идентификации, и эти результаты должны предоставляться субъекту в форме, не вызывающей особых интеллектуальных трудностей при их практическом использовании. Подобная позиция, в частности, означает что собственные методологические и математические исследования дисциплины рассматриваются как инструменты для получения практически эффективных средств идентификации. И с этой точки зрения определяется их ценность и актуальность.

Здесь основную роль играет системный подход к исследованию проблем идентификации, фундаментальные исследования математических и вычислительных проблем управления, концептуальных аспектов идентификации и моделирования, компьютерных проблем развития информационно-вычислительной среды, моделировании эргатических систем. На концептуальном уровне считается, что в процессе структурной идентификации существенную роль играют интуиция и жизненный опыт лица, принимающего решение. *На уровне конкретного теоретического исследования основные интеллектуальные усилия направляются на структуризацию и абсолютную формализацию данного процесса*. В рамках математического дисциплинарного образа наиболее важны теоретические исследования по разработке алгоритмов генерации и перебора структур (структура – заданное семейство математических уравнений), выбор и оценка качества «наилучшей» структуры. Налицо конфликт между разными образами структурной идентификации, являющийся важным фактором постановки и решения новых теоретических задач. Не менее сложная ситуация связана со словом «адекватность». В настоящее время содержанием математической теории структурной идентификации является математическое моделирование и исследование актуальных проблем локальных фрагментов без учета их реального контекста (их учет возможен при наличии отображения всего наглядного образа на дисциплинарный уровень при разработанных математических основах структурной идентификации). Широко распространено словосочетание «структура математической модели объекта». Смысл выражения интуитивно ясен. Сложность вызывает обоснование употребления слова «структура». В математике этот термин имеет точно определенный смысл и существенно отличается от традиционно принятого в теории идентификации. Поэтому в настоящее время употребляется выражение «тип модели объекта», которое трактуется как семейство уравнений, к которому принадлежит модель объекта (в случаях, когда речь идет не о математической модели, например «структура содержательной модели объекта», внутренних возражений употребления слова «структура» не возникает). Как видим, идентификация может рассматриваться как процесс порождения знания, необходимого для внедрения в практику методов и алгоритмов математики.

При поиске решений задач управления сложными системами наибольшая ответственность возникает при процедуре принятия решений. Рассматриваемые системы плохо формализуемы; к ним сложно применить аппарат математического программирования. Сама процедура принятия решения затрудняется сложной *иерархией* задач. Задачи оперативного управления являются лишь фрагментами глобальной задачи управления и локальной задачи; должны отслеживаться их критерии. *Большинство из рассматриваемых задач можно решить лишь на междисциплинарном уровне (желательно каждый фрагмент локальной или глобальной задачи – в пределах одной дисциплины), что требует подготовки соответствующего интеллектуального потенциала внутри различных дисциплинарных научных школ*. Попытки построения полностью автоматических систем управления качеством в большинстве случаев обречены на неудачу, поскольку Человек имеет безусловный приоритет перед резуль-

татами анализа: попытки создания автоматизированных систем оценки качества с применением алгоритмов параметрической идентификации являются актуальными. *Актуально и тиражирование эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности.*

Нами при синтезе строительных материалов зависимости между критериями в основном выявлялись методами факторного анализа и математической статистики и др.; эмпирические закономерности получались на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов. В соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач строится иерархическая структура системы – материала – с оценками её элементов, которая и служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем. При синтезе указанных систем (выбор рецептуры, технология и способ управления качеством) использовались различные способы оптимизации параметров системы (строительный материал), в том числе векторная оптимизация. *Неопределенность целей* преодолевалась использованием линейной свертки, введением некоторых контрольных показателей, построением множеств Парето и т.д. Параметрическая идентификация кинетических процессов основных физико-механических свойств материалов производилась по специально разработанному *функционалу качества* $\Phi(S)$: *качество материала тем выше, чем меньше $\Phi(S)$* ; области равных оценок качества материала определялись в виде

$$d_{k-1} \leq \Phi(S) < d_k;$$

k – класс системы; $k = \overline{1, N}$; N – балльность шкалы.

Аналогичная процедура может использоваться и при разработке рациональных концепций проектирования сложных технических управляемых систем с высоким порядком их математических моделей, содержащих элемент неопределенности, включающих большое число существенных нелинейностей и являющихся многоконтурными, многосвязными [7, 8].

Выводы

Предложена рациональная схема идентификации строительных материалов с позиций современных парадигм, которая содержит набор четко выделенных гипотез, с помощью которых можно объяснить наблюдаемые особенности идентификационного подхода как методологии научного исследования.

Список литературы

1. Бахтадзе, Н.Н. Идентификация систем на пути создания общей теории идентификации объектов управления / Н.Н. Бахтадзе, К.С. Гинсберг, Л.П. Боровских // Проблемы управления. – 2015. – № 3. – С. 79–83.
2. Гинсберг, К.С. Концептуальные основы методологии структурной идентификации для создания систем автоматического управления с требуемыми свойствами / К.С. Гинсберг // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2019. – № 1. – С. 38–48.
3. Королев, Е.В. Применение теории информации в решении задач строительного материаловедения / Е.В. Королев, Ю.А. Беленцов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 13–28.
4. 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.
5. 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.

6. Данилов, А.М. Системы и модели: имитационное моделирование сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Информатика и системы управления. – 2024. – № 2 (80). – С. 18–31.
7. Будылина, Е.А. Формирование свойств композитов: от эмпирического подхода к фундаментализации / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С.33–39.
8. Королев, Е.В. Практические аспекты идентификации и управления при синтезе композитов / Е.В. Королев, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2 (51). – С. 24–32.

References

1. Bakhtadze, N.N. Identification of systems on the way to creating a general theory of identification of control objects / N.N. Bakhtadze, K.S. Ginsberg, L.P. Borovskikh // Control Sciences. – 2015. – №3. – P. 79–83.
2. Ginsberg, K.S. Conceptual foundations of the methodology of structural identification for creating automatic control systems with the required properties / K.S. Ginsberg // Information technology and computing systems. – 2019. – №. 1. – P. 38–48.
3. Korolev, E.V. Application of information theory in solving problems of building materials science / E.V. Korolev, Yu.A. Belentsov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №3 (56). – P. 13–28.
4. Budylna, E.A. Identification and examination of complex systems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – №4 (57). – P. 21–29.
5. Budylna, E.A. Systems analysis as a methodology for solving problems / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2 (55). – P. 14–20.
6. Danilov, A.M. Systems and models: simulation modeling of complex systems / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Computer science and control systems. – 2024. – № 2 (80). – P. 18–31.
7. Budylna, E.A. Formation of composite properties: from an empirical approach to fundamentalization / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 1 (58). – P.33–39.
8. Korolev, E.V. Practical aspects of identification and management in the synthesis of composites / E.V. Korolev, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2 (51). – P. 24–32.

УДК 691.261

DOI 10.54734/20722958_2024_4_29

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

Россия, 163002, Архангельск,
наб. Северной Двины, 22,
тел.: (8182) 41-28-34;
факс: (8182) 41-28-33

Орехова Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
E-mail: nefact@mail.ru

Фролова Мария Аркадьевна,
кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры композиционных
материалов и строительной экологии
E-mail: m.isenshtadt@narfu.ru

Сивальнева Мариана Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
E-mail: 549041@mail.ru

Строкова Валерия Валерьевна,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
E-mail: vvstrokova@gmail.com

АО «Севералмаз»

Россия, 163000, Архангельск, ул. Карла
Маркса, 15, тел.: (8182) 65-75-07, факс:
(8182) 65-75-27

Тюрин Алексей Михайлович,
кандидат технических наук, начальник ПТО
E-mail: TyurinAM@severalmaz.alrosa.ru

*Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov*

Russia, 163002, Arkhangelsk, 22,
Severnaya Dvina emb.,
tel.: (8182) 41-28-34;
fax: (8182) 41-28-33

Orekhova Tatiana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher
E-mail: nefact@mail.ru

Frolova Maria Arkadyevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Composite Materials and Building Ecology
E-mail: m.isenshtadt@narfu.ru

Sivalneva Mariana Nikolaevna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher
E-mail: 549041@mail.ru

Stroкова Valeria Valerievna,
Doctor of Sciences, Professor, Chief
Researcher
E-mail: vvstrokova@gmail.com

JSC «Severalmaz»

Russia, 163000, Arkhangelsk, 15,
Karla Marks St.,
tel.: (8182) 65-75-27; fax: (8182) 65-75-27

Tyurin Alexey Mikhailovich,
Candidate of Sciences, Head of production
and technical department
E-mail: TyurinAM@severalmaz.alrosa.ru

Работа выполнена при поддержке комплексного проекта (Постановление Правительства Российской Федерации № 218) «Создание высокотехнологичной системы подготовки оборотной воды обогатительной фабрики АО «Севералмаз» с переработкой отходов в товарную продукцию» (Соглашение № 075-11-2023-013 от 15.02.2023).

СВОЙСТВА САПОНИТСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА – ОТХОДА ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Т.Н. Орехова, М.А. Фролова, М.Н. Сивальнева, В.В. Строкова, А.М. Тюрин

Изучены основные физико-химические свойства сапонитсодержащего материала, являющегося отходом горноперерабатывающей промышленности Архангельской алмазonoной провинции, с целью рассмотрения возможности его применения в качестве активной минеральной добавки для композиционных строительных материалов. Данное решение имеет важное практическое значение за счет утилизации отхода путем перевода в товарный продукт для строительной отрасли и возможности использования воды, выделяемой из сапонитсодержащей суспензии.

Ключевые слова: отход, сапонитсодержащий материал, минеральная добавка, дисперсность, активность

PROPERTIES OF SAPONITE-CONTAINING MATERIAL – A WASTE OF MINING AND PROCESSING INDUSTRY OF THE ARKHANGELSK DIAMONDIFEROUS PROVINCE

T.N. Orekhova, M.A. Frolova, M.N. Sivalneva, V.V. Strokova, A.M Tyurin

The paper studies the basic physico-chemical properties of saponite-containing material, which is a waste of the mining and processing industry of the Arkhangelsk diamondiferous province, in order to consider the possibility of its use as an active mineral additive for composite building materials. It is very important due to the utilisation of wastes by converting them into a marketable product for the construction industry and the possibility of using recycled water released from saponite-containing suspension.

Keywords: waste, saponite-containing material, mineral additive, dispersion, activity

Введение. Сапонитсодержащий материал (ССМ) является вторичным продуктом обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова обогатительной фабрики АО «Севералмаз» и представляет собой многотоннажный отход горноперерабатывающей промышленности Архангельской алмазодобывающей провинции (ААП). Особенностью данного месторождения является высокое (30–70 %) содержание минералов группы смектитов. Глинистые породы, содержащие сапонит и монтмориллонит, подвергаются в процессе обогащения и добычи алмазов водонасыщению, что приводит к их увеличению в объеме в 3–4 раза [1, 2].

При проведении промышленной разработки данного месторождения сапонитсодержащие отходы находятся в водной среде в виде суспензии, что затрудняет использование технологической воды в системе оборотного водоснабжения фабрики. Как результат, в процессе обогащения песчано-глинистые породы в состоянии насыщения водой направляются в хвостохранилища, где годовым объемом до 4 млн тонн складированы в отходы [3].

Помимо увеличения площадей, занимаемых хвостохранилищами, острой проблемой является потребность обогатительной фабрики в оборотной воде с низким содержанием твердых частиц взвеси. Процессы очистки и получения оборотной воды требуемого качества, а также переработка сапонитсодержащего материала в товарный продукт являются актуальным направлением, в рамках которого научно-исследовательская работа ведется достаточно давно различными коллективами ученых [1, 2, 4].

Авторами данной статьи рассматривается возможность решения указанной проблемы на различных уровнях (региональном и отраслевом) за счет разработки научно-практических принципов применения сапонитсодержащего отхода в строительной отрасли. Региональный уровень заключается в решении экологических проблем за счет утилизации отхода горноперерабатывающей промышленности, снижения площадей, занимаемых хвостохранилищами, а также использования местного сырья в условиях ограниченности ресурсной базы. Отраслевой уровень значимости основывается на возможности применения оборотной воды, выделяемой из сапонитсодержащего отхода путем удаления твердой фракции, и включения ее в систему замкнутого водооборота обогатительной фабрики, что, в свою очередь, приводит к сокращению объемов потребления водных ресурсов и их экономии.

В частности, в данной работе рассматривается возможность применения сапонитсодержащего материала в качестве активной минеральной добавки для бетонов. В связи с чем был проведен комплекс исследований по изучению различных свойств данного сырья в исходном его состоянии.

Материалы и методы исследований. Объектом изучения является отход обогатительной фабрики АО «Севералмаз», ведущей деятельность в сфере промышленной разработки месторождений алмазов на территории Архангельской области, – сапонитсодержащий материал, в исходном виде представляющий собой песчано-глинистую породу в обводненном состоянии, у которой были определены физико-химические свойства. При центрифугировании пробы с целью визуализации выявляется расслоение суспензии с выделением выраженных 4-х слоев: вода; глинистая

суспензия; переходный слой, состоящий из глинистой суспензии и высокодисперсной песчаной фракции; осадок в виде крупнодисперсной песчаной фракции.

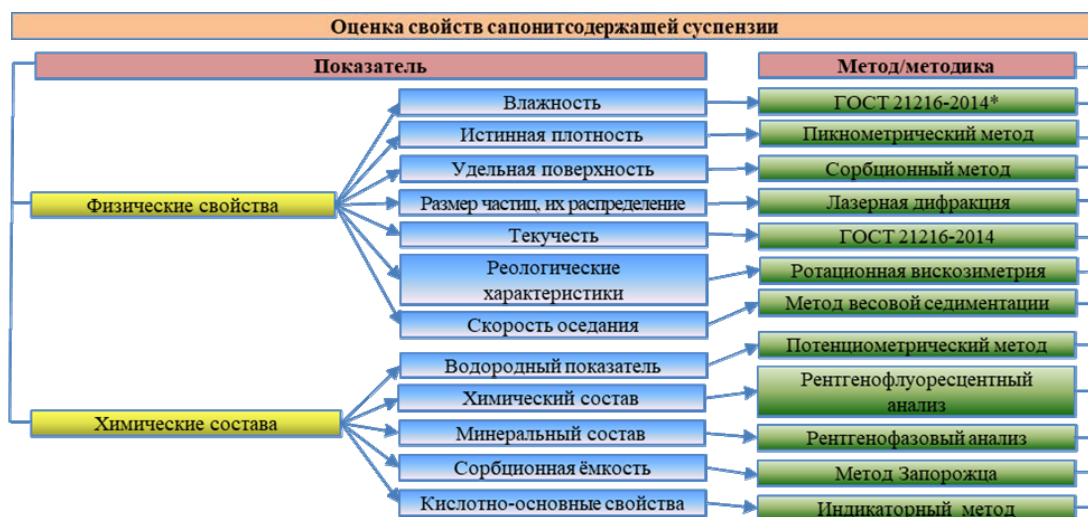
Ввиду неустойчивости системы перед отбором проб на все виды исследований исходный материал (суспензия ССМ) подвергался гомогенизации в гравитационной шаровой лабораторной мельнице без мелющих тел при низких оборотах. Отобранные для исследований пробы помещались в герметично закрывающиеся емкости. Для отдельных видов исследований пробы высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу. После чего анализу подвергался полученный порошок ССМ.

Для определения активности поверхности исследовались следующие образцы, разделенные на фракции путем промывки водой через сито № 0063:

- песчано-глинистая фракция;
- глинистая фракция;
- песчаная фракция (остаток на сите);
- все указанные пробы (глинистая, песчаная и песчано-глинистая фракции в отдельности), обожженные при температуре 700 °С в муфельной печи.

Методология данной работы основана на современном состоянии исследований в области использования отходов отраслей природопользования, которое показывает ограниченность комплексного подхода в управлении и прогнозировании физико-химических свойств применяемых в качестве сырья минеральных систем.

Для оптимизации лабораторных исследований приведена декомпозиция необходимых показателей и методик, позволяющих учитывать различные характеристики минерального сырья и проводить его оценку (рис. 1).



*Скорректированная методика

Рис. 1. Декомпозиция методологии проведения оценки свойств сапонитсодержащего материала

Изучались физико-химические свойства ССМ. Некоторые показатели определялись согласно методикам, представленным в действующих ГОСТах. Следует отметить, что методика определения влажности материала была скорректирована. Традиционно влажность устанавливают путем высушивания материала в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре (105±5) °С (ГОСТ 21216–2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний»). В данном случае влажность определялась при температуре 70 °С, что связано с необходимостью использования щадящего температурного режима, выбор которого обусловлен требованием удаления свободной, а не связанной воды из системы без влияния на свойства глинистой составляющей суспензии.

Для измерения дисперсности ССМ использовались сорбционный метод (прибор SoftSorbi-II ver.1.0) и метод лазерной дифракции (лазерный анализатор размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus).

Реологические характеристики суспензии определялись с использованием ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1, возможности которого позволяют произво-

дить измерения в широком диапазоне напряжений сдвига и скоростей среза, при этом автоматически снимаются кривые вязкости и текучести. Режимы съемки: цилиндрическая измерительная система, скорость вращения рабочего ротора – 120 об/мин, продолжительность – 2 мин.

Определение химического и минерального составов производилось с использованием метода рентгеновской дифракции при рентгенофлуоресцентном и рентгенофазовом анализе.

Оценка активности поверхности образцов ССМ проводилась при определении сорбционной емкости и кислотно-основных свойств. Изучение сорбционной способности минеральной системы осуществлялось методом Запорожца [5], который позволяет оценить активность твердой фазы суспензии. В ходе проведения эксперимента определяли снижение концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в насыщенном известковом растворе в результате поглощения частицами ССМ.

Определение кислотно-основных свойств осуществлялось индикаторным методом. Для описания кислотно-основной природы поверхностных центров используется теория Бренстеда – Лоури и Льюиса. Суть методики, позволяющей определить тип и количество активных центров на поверхности анализируемого материала, заключается в адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде [6], что приводит к изменению окраски индикаторов, которая, в свою очередь, позволяет определить величину кислотности (основности) поверхности.

Результаты и их анализ. Первоначально исследовался сапонитсодержащий материал в виде песчано-глинистой породы в обводненном состоянии, у которого определялись основные физико-химические свойства (табл. 1). Следует отметить, что в связи с принципами работы и особенностями приборов для изучения определенных свойств (определение состава, дисперсных показателей, активности поверхности) суспензия высушивалась.

Минеральный состав исследуемой пробы представлен глинистыми минералами, основными из которых являются сапонит и монтмориллонит, а также кварц, кальцит и др. [7].

Т а б л и ц а 1

Физико-химические свойства ССМ в исходном состоянии

Параметр	Значение
Суспендированное состояние ССМ	
Водородный показатель (pH)	8,2
Влажность, %	60
Содержание твердой фракции, %	40
Порошкообразное состояние ССМ	
Плотность истинная, кг/м^3	2560
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	6150

Химический состав исходной суспензии представлен элементами: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O и K_2O (табл. 2). Суммарное содержание других элементов, находящихся в малом количестве, составляет порядка 0,5 %.

Т а б л и ц а 2

Результаты определения химического состава ССМ (в пересчете на оксиды)

Вещество	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Проч.
Количество, %	49,15	31,94	6,10	5,53	3,24	1,27	1,00	0,70	0,54	0,53

Ввиду того что исходный вид ССМ – суспендированное состояние песчано-глинистой массы, изучались показатели седиментационной устойчивости, отражающие скорость оседания частиц суспензии. В течение первых 70 с происходит осаждение частиц крупной (песчаной) фракции.

Реологические характеристики являются важным и информативным показателем для оценки сырьевых смесей как при проектировании материалов строительного

назначения, так и при разработке технологий обезвоживания отходов в виде шламов и суспензий с целью выделения твердой фракции.

Свойства дисперсионной среды, образованной взаимодействием с водой частиц слоистых алюмосиликатов, характеризующихся способностью к набуханию, и частиц типа кварца, на структуру которых вода не оказывает влияния, а также структурно-механическая сущность процессов, протекающих в данных системах, определяют необходимость изучения реологических характеристик суспензии ССМ. К числу важных вопросов реологии дисперсных систем относится регулирование вязкости водных минеральных суспензий, агрегативной устойчивости и их влияние на процессы структурообразования в начальный период. В этой связи оценка структурных особенностей суспензии ССМ позволит осуществить прогнозную оценку при выборе оборудования, оптимизации технологических операций и разработке технологии очистки оборотной воды с минимальными потерями при выделении минерального компонента.

Изучение реотехнологических характеристик связано с определением текучести, являющейся необходимым контролируемым параметром для глинистого сырья, и реологических свойств (зависимостей вязкости, градиента скорости сдвига, напряжения сдвига) на современном ротационном вискозиметре.

Текучесть суспензии ССМ определяли при 30 с и 30 мин выстаивания, полученные значения составили 5,5 с и 6,4 с соответственно. Анализ результатов показал, что по продолжительности и характеру истечения испытанная суспензия ССМ соответствует требованиям «хорошего шликера» согласно ГОСТ 21216–2014.

Анализ реологических кривых, отображающих зависимости эффективной вязкости (η) от градиента скорости сдвига ($\dot{\epsilon}$), показывает тиксотропный тип течения сапонитсодержащей суспензии, заключающийся в плавном снижении вязкости при увеличении градиента скорости сдвига (рис. 2, а).

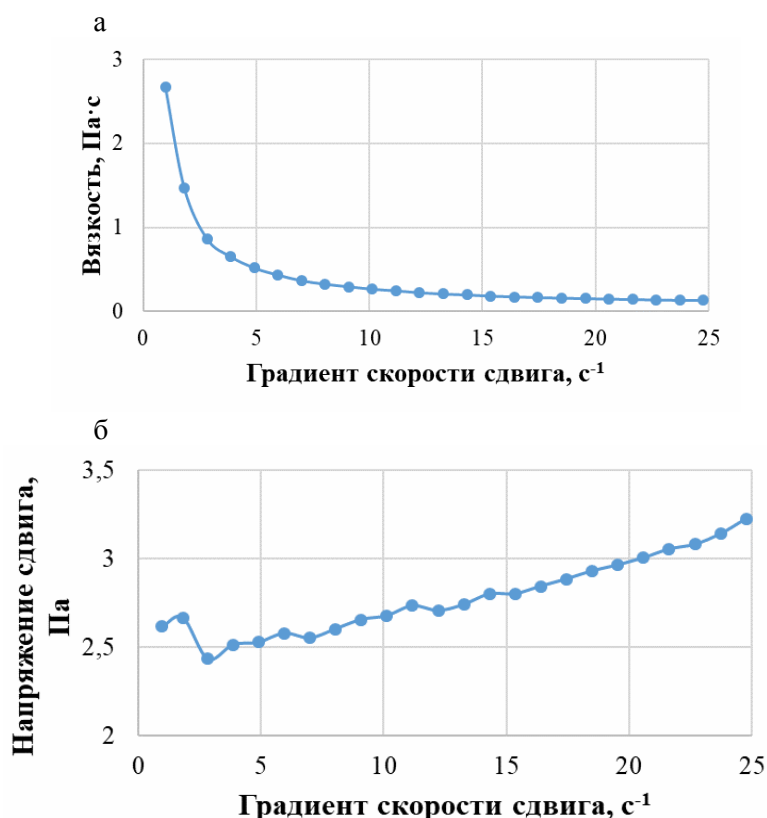


Рис. 2. Реограммы суспензии ССМ:

а – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

б – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига

При малых значениях градиента скорости сдвига ($\dot{\epsilon} \approx 1 \text{ с}^{-1}$) система отличается максимальной начальной вязкостью, характеризующей неразрушенную структуру исследуемой суспензии (рис. 2, а). Это обусловлено взаимодействием частиц в воде при превышении определённой концентрации и началом образования непрочных связей, которые быстро разрушаются. Увеличение градиента скорости сдвига сопровождается уменьшением эффективной вязкости до установления практически постоянного значения – начала течения системы. Рассмотрена графическая зависимость градиента скорости сдвига от напряжения сдвига (рис. 2, б), подтверждающая, что исследованные суспензии относятся к неньютоновским жидкостям, обладающим тиксотропными свойствами.

Гранулометрический состав ССМ в исходном состоянии (рис. 3, а) показал, что характер распределения частиц суспензии отличается бимодальностью с выраженным присутствием определенного количества фракции с размером 400–600 мкм. Аналогичный характер распределения частиц имеет образец с выделенной песчаной фракцией, в котором преобладают частицы 100–800 мкм (рис. 3, в). Глинистая фракция характеризуется переходом размера частиц в меньшую область (0,1–100 мкм) с преобладанием ряда интервалов: 3–5 мкм, 10–40 мкм, 50–80 мкм (рис. 3, б). Наблюдается присутствие ультрадисперсной фракции с определенным количеством частиц размером менее 0,1 мкм.

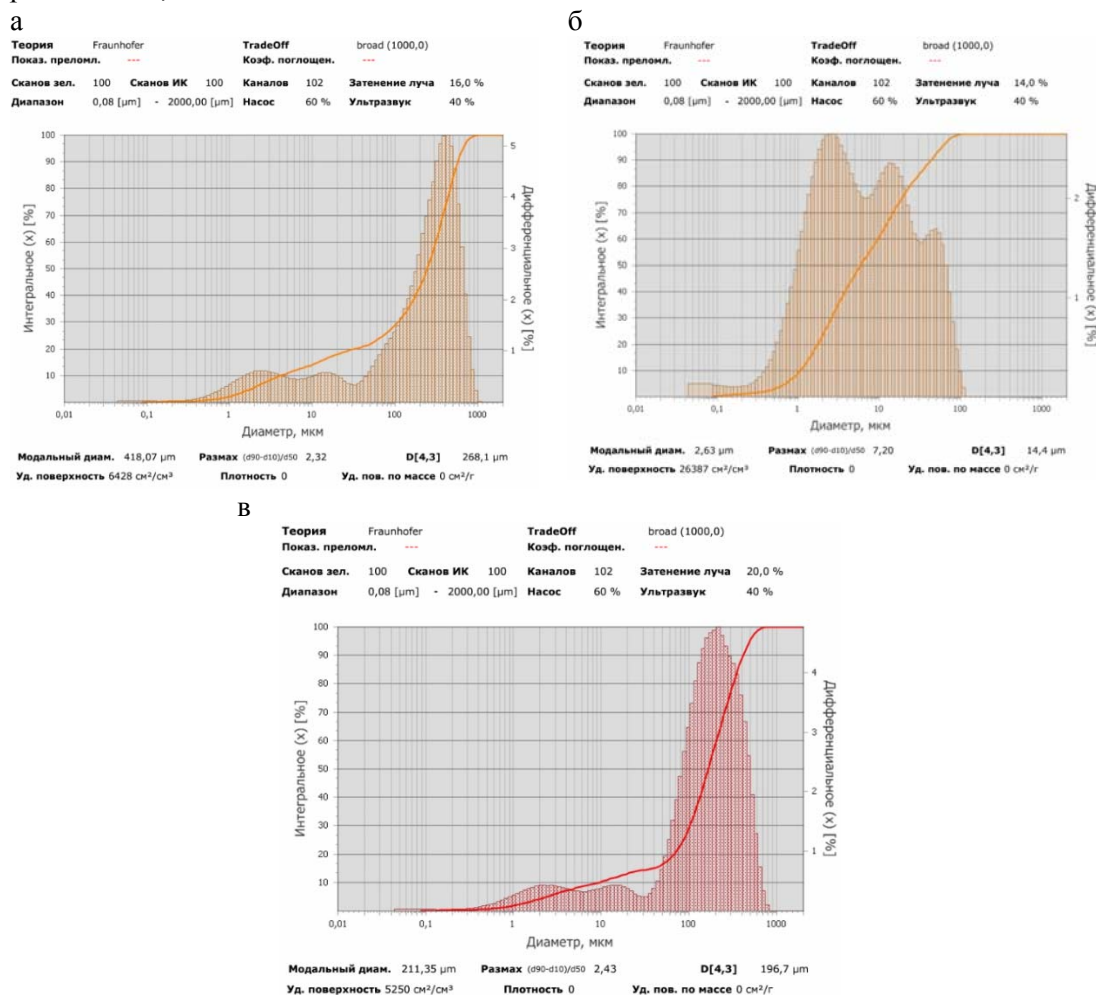


Рис. 3. Гранулометрический состав ССМ:

а – исходное состояние (песчано-глинистая фракция); б – глинистая фракция;
в – песчаная фракция

Определение активности поверхности данного материала предполагает предварительную подготовку в виде разделения суспензии ССМ на три фракции (глинистую, песчаную и песчано-глинистую) с последующим их высушиванием и обжигом до

700 °С. Данный вид исследования включает определение сорбционной емкости и активных центров адсорбции на поверхности.

Определение сорбционной емкости предполагает исследование активности поглощения извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из раствора навеской материала (рис. 4). Анализ полученных результатов показал, что глинистая фракция обладает максимальной активностью (72,5 мг/г), превышающей результат суспензии ССМ (обобщенной, т.е. песчано-глинистой фракции) на 32 %. Объясняется это высокой дисперсностью глинистой составляющей, развитой морфологией поверхности частиц слоистых алюмосиликатов. На этом основании можно заключить, что именно глинистая фракция вносит значительный вклад в общую активность исследуемого материала. Песчаная фракция, ввиду большей крупности частиц, обладает меньшей активностью.

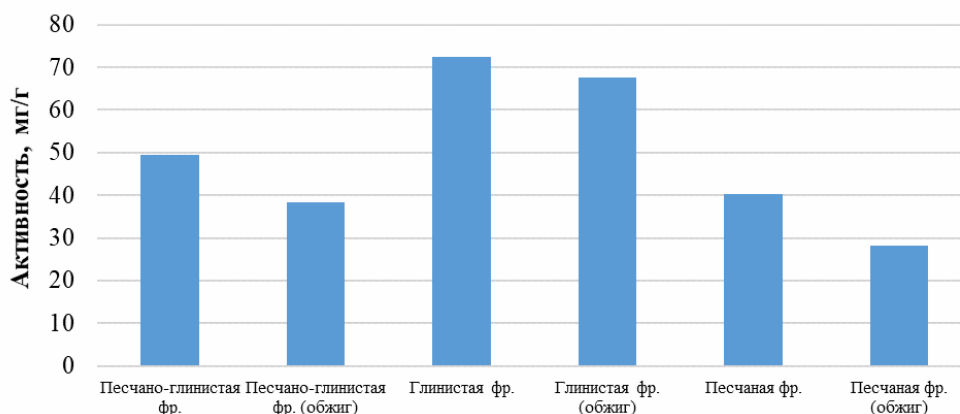


Рис. 4. Активность ССМ различных фракций

Проведение температурной обработки снижает активность всех исследованных образцов ССМ: на 22 % – для песчано-глинистой фракции, на 7 % – для глинистой и на 30 % – для песчаной.

При воздействии высоких температур в процессе обжига происходят спекание частиц материала, аморфизация песчаной фракции, а также развитие начальных процессов распада глинистых минералов, образование новых структур. Несмотря на это, после обжига в материале сохраняются достаточно высокие показатели активности (65–67 мг/г), сопоставимые с результатами по активности для природных и техногенных материалов, применяемых в качестве пуццолановых добавок (микрокремнезем, перлит, зола и др.) [5, 8].

В качестве критерия управления поверхностными процессами выделяют кислотно-основные свойства, т.к. они теоретически прогнозируются, экспериментально контролируются, а также коррелируют с другими свойствами системы. Возможность изменения кислотно-основных свойств связана с зависимостью от химической природы вещества и его чистоты, способа синтеза и последующей обработки, дисперсности, пористости и др.

Изучение кислотно-основных свойств поверхности твердого вещества подразумевает определение концентрации активных центров (q_{pKa}), эквивалентной количеству адсорбированного индикатора кислотной силы (pKa). Проанализировав полученные значения содержания центров адсорбции, можно спрогнозировать механизм и степень протекания физико-химических процессов на поверхности твердого тела [9–11].

Поверхность исследуемых дисперсных материалов представляет собой совокупность центров Льюиса и Брендстеда. Не представлены активные центры, соответствующие кислотам Льюиса ($\text{pKa} > +15,7$), ввиду отсутствия соответствующих индикаторов. Ограниченность их использования вызвана токсичностью, а следовательно, сложностью приобретения и применения в лабораторных условиях.

При сравнении необожженных образцов на всем исследуемом диапазоне по повышению концентрации активных центров глинистая фракция превосходит остальные

образцы (рис. 5), что обусловлено как их дисперсностью, так и различным минеральным составом.

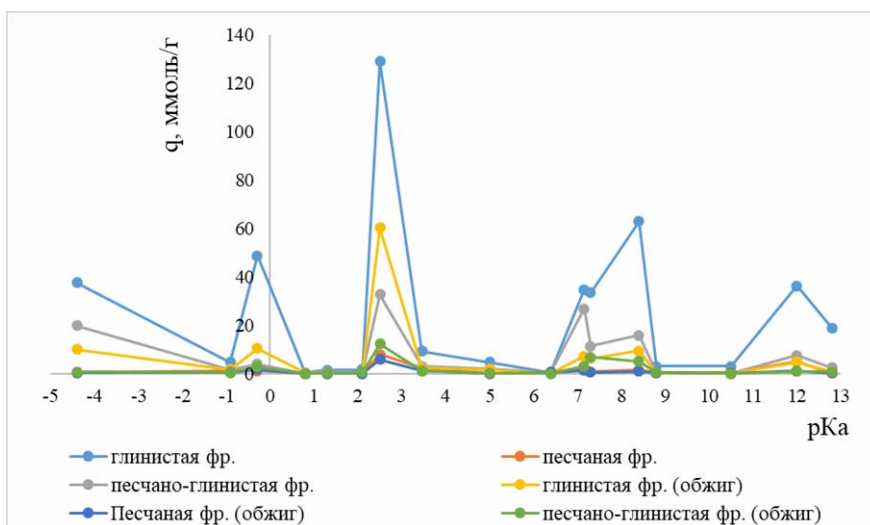


Рис. 5. Распределение центров адсорбции на поверхности ССМ различных фракций

Анализ результатов распределения активных центров адсорбции на поверхности глинистой фракции показал максимальное их преобладание в области бренстедовских центров как для кислот ($pK_a=2,5$), так и для оснований ($pK_a=8,4$; 12). Согласно теории Бренстеда, преобладание на поверхности основных центров происходит за счет сдвига электронной плотности от атома элемента на орбиталь кислорода, что отвечает упрочнению связи в ОН-группе. Температурная обработка приводит к снижению концентрации активных центров.

Для обобщения полученных данных представлено суммарное количество активных кислотных центров на поверхности различных образцов (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Количество центров адсорбции различной природы
на поверхности частиц различных фракций ССМ

Наименование образца	Количество центров адсорбции, ммоль/г			
	Основания по Льюису	Кислоты по Бренстеду	Основания по Бренстеду	Общее количество
Песчано-глинистая фракция (ССМ)	25,5	39,7	64,9	130,1
Песчано-глинистая фракция (обжиг)	4,2	14,8	17,6	36,5
Глинистая фракция	91,2	147,3	192,2	430,7
Глинистая фракция (обжиг)	22,2	65,5	28,7	116,4
Песчаная фракция	2,8	11,8	10,9	25,4
Песчаная фракция (обжиг)	2,7	7,8	4,9	15,4

Анализ концентраций активных центров адсорбции показал, что наибольшее их количество имеет глинистая составляющая ССМ, далее – песчано-глинистая фракция и наименьшее – песчаная. Интерес представляет образец, совмещающий песчаную и глинистую фракции, так как при производстве строительных материалов планируется использование всего объема полиминеральной системы ССМ. В данном случае высокотемпературное воздействие способствует снижению активных центров на всем диапазоне шкалы pK_a , что логично и связано с изменением структуры кристаллической решетки глинистых минералов при 700 °С и, как следствие, с уменьшением сорбционной емкости и активной удельной поверхности частиц, снижением количества и изменением типа активных центров.

При этом наблюдается достаточная концентрация активных центров адсорбции для ССМ, как и для других аналогичных материалов, применяемых в качестве пуццолановых добавок. Основное повышение приходится на центры Бренстеда, представляющие собой гидратно-гидроксильный покров поверхности частиц.

Выводы. Таким образом, был проведен анализ основных свойств исходного сапонитсодержащего отхода как в суспендированном, так и в порошкообразном состоянии с целью рассмотрения возможности его применения в качестве активной минеральной добавки для бетонов. Для детального изучения ССМ был разделен на песчаную, глинистую и песчано-глинистую фракции; оценивалось влияние температурной обработки на активность их поверхности.

Изучение характеристик суспензии ССМ входит в этап работ по использованию и очистке оборотной воды обогатительной фабрики. Выявленные седиментация и тиксотропия имеют важное значение для технологического процесса. Первое явление позволяет оценить начальный уровень самопроизвольного отделения твердой фракции, а второе (характер течения) – обеспечить возможность упрощения и контроля транспортирования суспензии до заданных пунктов.

Изучение ССМ в виде дисперсного порошка ложится в основу его применения в качестве добавки. Исследуемый материал отличается бимодальностью и имеет частицы со средним размером 400–600 мкм. Глинистая составляющая вносит вклад в общую дисперсность, обеспечивает переход размера частиц в меньшую область с присутствием ультрадисперсной фракции (размер частиц менее 0,1 мкм) в малом количестве. Определение активности позволило выделить преимущество глинистой фракции как наиболее активной. Также выявлено воздействие высокотемпературной обработки на характеристики сырья: анализ данных показывает снижение сорбционной емкости и числа активных центров на поверхности материала. Данный факт может быть связан с дисперсностью системы, с изменением структуры кристаллической решетки глинистых минералов при температурной обработке, с перестройкой и формированием новых связей.

Список литературы

1. Облицов, А.Ю. Утилизация отходов обогащения алмазосодержащей породы с учетом специфики месторождения им М.В. Ломоносова / А.Ю. Облицов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 141–145.
2. Карпенко, Ф.С. Влияние сапонита на устойчивость гидротехнических сооружений хвостохранилищ на месторождении им. М.В. Ломоносова Архангельской области / Ф.С. Карпенко // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2008. – № 3. – С. 269–271.
3. Малыгина, М.А. Структурная модификация сапонитсодержащего материала при его механическом диспергировании / М.А. Малыгина, А.М. Айзенштадт, Т.А. Дроздук, М.А. Фролова, М.А. Пожилов // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 32–38. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-32–38.
4. Тутыгин, А.С. Осветление сапонитсодержащей суспензии методом электролитной коагуляции / А.С. Тутыгин, А.А. Шинкарук, А.М. Айзенштадт, М.А. Фролова, Т.А. Махова, М.П. Боброва // Вода: химия и экология. – 2013. – № 5 (59). – С. 93–99.
5. 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. – № 6. – С. 25–30. – DOI: 10.17580/or.2019.06.05
6. Байдарашвили, М.М. Исследование сорбционных свойств материалов с помощью физико-химического метода распределения центров адсорбции / М.М. Байдарашвили, А.С. Сахарова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 87–94. – DOI:10.17308/sorpchrom.2020.20/2383.

7. Дроздук, Т.А. Высокотемпературная модификация сапонитсодержащего материала / Т.А. Дроздук, А.М. Айзенштадт, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2021. – № 11. – С. 30–36. – DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35.
8. Марков, А.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов / А.Ю. Марков, В.В. Строкова, И.Ю. Маркова // Строительные материалы. – 2019. – № 4. – С. 77–83. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83.
9. Шапорова, Е.А. Кислотно-основные свойства поверхности оксида хрома(III) / Е.А. Шапорова, А.А. Жукова, А.К. Баев, А.Ю. Сидоренко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 270–277. – DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-3-270-277.
10. Сковрцова, Л.Н. Исследование кислотно-основных и сорбционных свойств поверхности металлокерамических композитов / Л.Н. Сковрцова, Л.Н. Чухломина, Т.С. Минакова, М.В. Шерстобоева // Журнал прикладной химии. – 2017. – Т. 90, вып. 8. – С. 1014–1019.
11. Неровная, С.В. Кислотно-основные свойства поверхности микроармирующих фибр как компонента фотокаталитического композиционного материала для штукатурных смесей / С.В. Неровная, М.Н. Сивальнева, В.В. Строкова, Ю.Н. Огурцова, Е.Н. Губарева, Е.В. Клименкова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 9. – С. 8–19. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-8-19.

References

1. Oblitsov, A.U. Utilization of enrichment waste of diamondiferous rock accounting peculiarities of M.V. Lomonosov deposit / A.U. Oblitsov // Journal of Mining Institute. – 2011. – Vol. 189. – P. 141–145.
2. Karpenko, F.S. Influence of Saponite on the Stability of Hydraulic Structures of Tailings Dump at the Deposit im. M.V. Lomonosov Arkhangelsk Region / F.S. Karpenko // Geokologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya. – 2008. – Issue 3. – P. 269–271.
3. Malygina, M.A. Structural Modification of Saponite-Containing Material During Its Mechanical Dispersion / M.A. Malygina, A.M. Ayzenshtadt, T.A. Drozdyuk, M.A. Frolova, M.A. Pozhilov // Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). – 2022. – Issue 9. – P. 32–38. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38.
4. Tutygin, A.S. Clarification of Saponite-Containing Suspension Using Electrolytic Coagulation / A.S. Tutygin, A.A. Shinkaruk, A.M. Aizenshtadt, M.A. Frolova, T.A. Makhova, M.P. Bobrova // Water: Chemistry and Ecology. – 2013. – Issue 5 (59). – P. 93–99.
5. Gubareva, E.N. Comparative activity evaluation for silica raw materials and photocatalytic composite materials based on them / E.N. Gubareva, Yu.N. Ogurtsova, V.V. Stroкова, M.V. Labuzova // Obogashchenie Rud. – 2019. – Issue 6. – P. 25–30. – DOI: 10.17580/or.2019.06.05.
6. Baidarashvili, M.M. The study of the sorption properties of materials using physico-chemical method of adsorption sites distribution / M.M. Baidarashvili, A.S. Sakharova // Sorption and chromatographic processes. – 2020. – Vol. 20, Issue 1. – P. 87–94. – DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2383.
7. Drozdyuk, T.A. High-temperature modification of saponite-containing material / T.A. Drozdyuk, A.M. Ayzenshtadt, E.V. Korolev // Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). – 2021. – Issue 11. – P. 30–36. – DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-30-35.
8. Markov, A.Yu. Evaluation of properties of fuel ashes as components of composite materials / A.Yu. Markov, V.V. Stroкова, I.Yu. Markova // Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). – 2019. – Issue 4. – P. 77–83. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83.
9. Shaporova, E.A. Acid-basic properties of a chromium (III) oxide surface / E.A. Shaporova, A.A. Zhukova, A.K. Baev, A.Yu. Sidorenko // Proceedings of the national academy of sciences of belarus. Chemical series. – 2021. – Issue 43. – P. 270–277. – DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-3-270-277.

10. Skvortsova, L.N. Investigation of acid-base and sorption properties of surface of metal-ceramic composites / L.N. Skvortsova, L.N. Chukhlomina, T.S. Minakova, M.V. Sherstoboeva // Zhurnal Prikladnoy Khimii. – 2017. – Vol. 90, Issue 8. – P. 1014–1019.

11. Nerovnaya, S.V. Acid-base properties of the surface of micro-reinforcing fibers as a component of a photocatalytic composite material for plaster mixes / S.V. Nerovnaya, M.N. Sivalneva, V.V. Strokova, Yu.N. Ogurtsova, E.N. Gubareva, E.V. Klimenkova // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2023. – Issue 9. – P. 8–19. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-8-19.

УДК 699.887

DOI 10.54734/20722958_2024_4_40

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

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

Черкасов Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Прикладная механика»

*Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики*

Россия, 607188, Нижегородская обл.,
г. Саров, просп. Мира, 37

Шербак Алексей Юрьевич,
инженер ВНИИЭФ
E-mail: alexshe52@yandex.ru

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

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

Cherkasov Vasily Dmitrievich,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the
Department «Applied Mechanics»
E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Cherkasov Dmitriy Vasilievich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Applied Mechanics»

*All-Russian Scientific Research Institute of
Experimental Physics*

Russia, 607188, Nizhny Novgorod region,
Sarov, 37, ave. Mira

Shcherbak Aleksey Yurievich,
VNIIEF Engineer
E-mail: alexshe52@yandex.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Организация импортозамещающего производства самоклеящихся радиопоглощающих материалов с повышенными защитными свойствами» в рамках Государственного контракта №075-11-2022-008 от 6 апреля 2022 г., идентификатор государственного контракта 0000005407522QMX0002.

ЭЛАСТИЧНЫЕ САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ

В.Д. Черкасов, Д.В. Черкасов, А.Ю. Шербак

Приводятся результаты исследований эластичных самоклеящихся радиопоглощающих материалов. В качестве связующего в них используется этиленпропиленовый каучук, а в качестве наполнителей – сочетание рубленого углеродного волокна и карбонильного железа, рубленого углеродного волокна и металлической окалины, окисленного графита и металлической окалины. Поглощение электромагнитного излучения в этих материалах составляет 50-80 %.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, защита, радиопоглощающий материал, эластичный, самоклеящийся

ELASTIC SELF-ADHESIVE RADIO-ABSORBING COATINGS

V.D. Cherkasov, D.V. Cherkasov, A.Y. Shcherbak

The article presents the results of research on elastic self-adhesive radio-absorbing materials. Ethylene propylene rubber is used as a binder, and a combination of chopped carbon fiber and carbonyl iron, chopped carbon fiber and metal scale, oxidized graphite and metal scale are used as fillers. The absorption of electromagnetic radiation in these materials is 50-80 %.

Keywords: electromagnetic radiation, protection, radio-absorbing material, elastic, self-adhesive

Введение. В настоящее время установлено негативное влияние электромагнитного излучения на окружающую среду [1]. За последние десятилетия уровень электромагнитного излучения увеличился в несколько раз. Источниками электромагнитного излучения являются сотовая и спутниковая связь, бытовая техника, средства навигации и др. Эффективный способ, позволяющий обеспечить требования электромагнитной экологии и безопасности, – это снижение электромагнитного излучения до приемлемого уровня. Такое возможно за счёт применения радиопоглощающих материалов и покрытий.

Отечественными и зарубежными организациями разработано значительное количество новых экранирующих и радиопоглощающих материалов, учитывающих современные технологические возможности производства и потребности в применении. Для решения задач электромагнитной совместимости и создания радиопоглощающих материалов разрабатываются материалы из вспененного стекла, специализированных пластмасс, композитные металлосодержащие волокнистые материалы [3–5, 8–14]. Используются разработки в области нанотехнологий. На основе гранулированных плёнок получены покрытия, поглощающие электромагнитные волны в широком СВЧ-диапазоне [6, 7].

Ведутся разработки по созданию принципиально нового класса всенаправленных бестоковых радиопоглощающих материалов и покрытий на основе применения механизма локального энергетического взаимодействия электромагнитного поля с гиромангнитной средой.

В настоящее время актуальным направлением в материаловедении является разработка и изготовление материалов для радиопоглощающих покрытий. Одной из важных задач при создании радиопоглощающих материалов является обеспечение требования высокого коэффициента поглощения и одновременно низкого отражения в широком диапазоне длин волн. Это определяет необходимость дальнейших исследований и разработки современных технологий получения радиопоглощающих материалов нового поколения с высокоэффективным поглощением электромагнитных излучений в широком диапазоне частот, высокой адгезионной прочностью к различным субстратам, термостойкостью, коррозионной стойкостью, стойкостью к другим экстремальным условиям.

Всем этим требованиям отвечают эластичные самоклеящиеся радиопоглощающие материалы на основе неотверждаемого герметика. В статье рассматривается создание радиопоглощающих материалов на основе невымываемых герметиков.

Методы и материалы. Разработаны радиопоглощающие материалы, у которых в качестве связующего использовали неотверждаемый герметик на основе этиленпропиленового каучука. Функциональным наполнителем в этих материалах явились рубленое углеродное волокно, окисленный графит, карбонильное железо и металлическая окалина.

Основными радиофизическими характеристиками радиопоглощающих материалов являются коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения [16]. Определение радиофизических характеристик проводили по ГОСТ 50011-92 (ГОСТ 30381-95) [17]. Структурная схема измерений представлена на рис. 1.

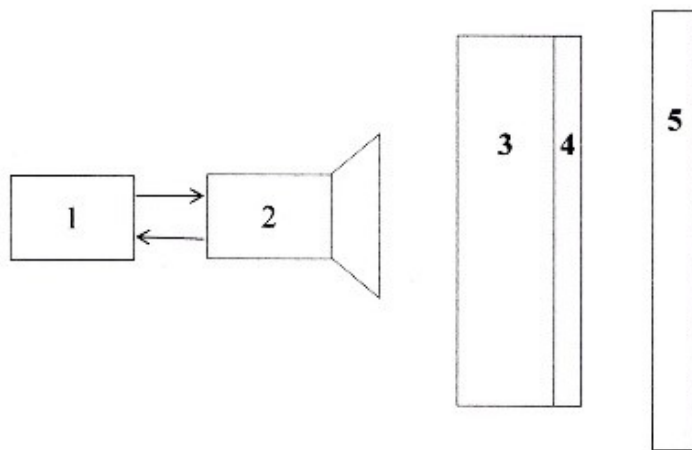


Рис. 1. Структурная схема измерений коэффициента отражения:

- 1 – скалярный анализатор цепей серии P2M; 2 – рупорная антенна; 3 – образец РПМ;
4 – металлическая пластина; 5 – ПЭВ (поглотитель ЭМИ)

Для определения коэффициента отражения из радиопоглощающего материала изготавливались образцы размером 300×300 мм и толщиной 1 и 2 мм. Измерения проводятся следующим образом: сначала металлическая подложка, а затем радио-

поглощающий материал на металлической подложке устанавливаются вплотную к раскрытию приемопередающей рупорной антенны.

Антенна перемещается вдоль своей оси, и фиксируются первые минимальные и максимальные показания прибора. После этого определяются коэффициенты отражения. Для определения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале производится сравнение коэффициентов отражения электромагнитного излучения от металлической подложки с коэффициентом отражения электромагнитного излучения от радиопоглощающего материала на металлической подложке.

Разница коэффициентов отражения электромагнитного излучения несет информацию о поглощенной в радиопоглощающем материале мощности сигнала. Чем больше разница между коэффициентами отражения, тем больше уровень поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале.

Результаты и обсуждения. Результаты исследований представлены на рис. 2–5.

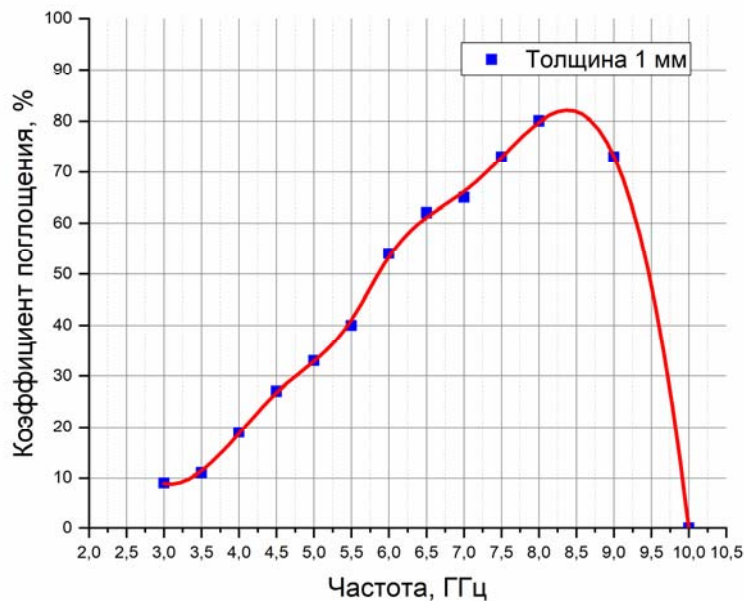


Рис. 2. Радиопоглощающий материал с содержанием рубленого углеродного волокна и карбонильного железа толщиной 1 мм

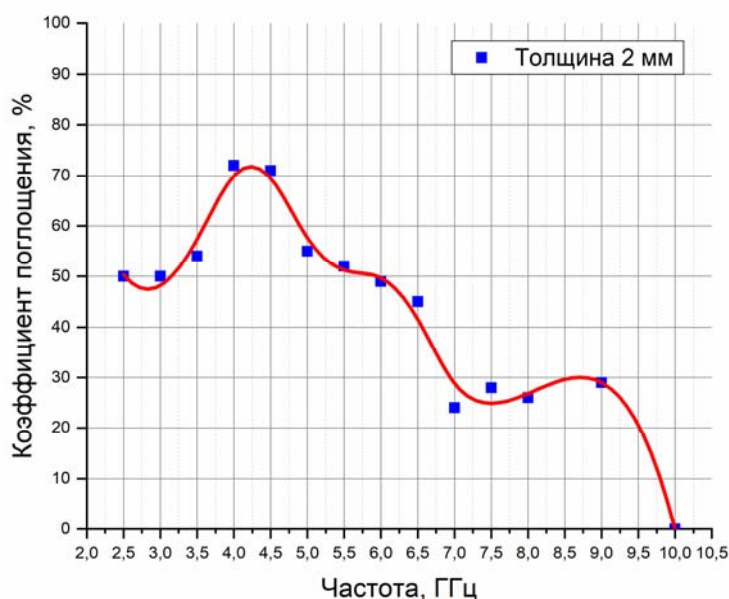


Рис. 3. Радиопоглощающий материал с содержанием углеродного волокна и карбонильного железа толщиной 2 мм

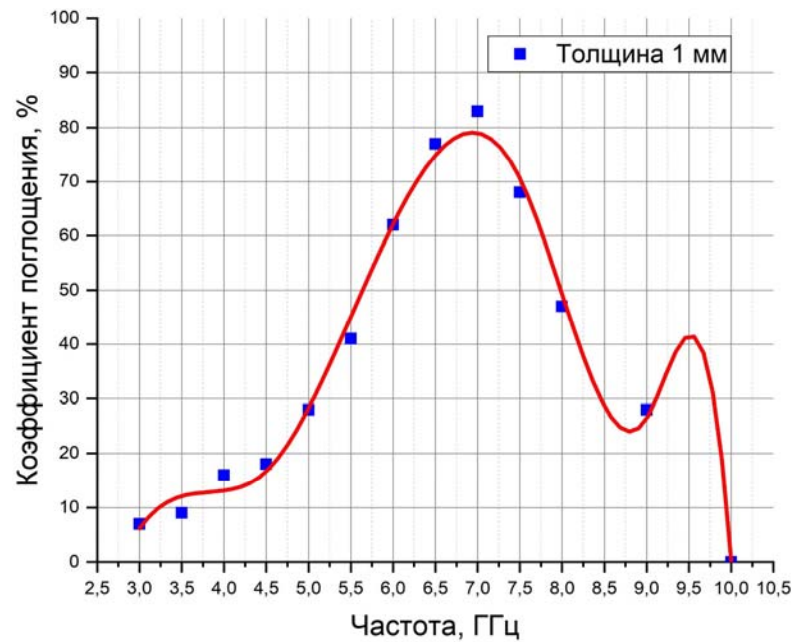


Рис. 4. Радиопоглощающий материал с содержанием углеродного волокна и металлической окалины толщиной 1 мм

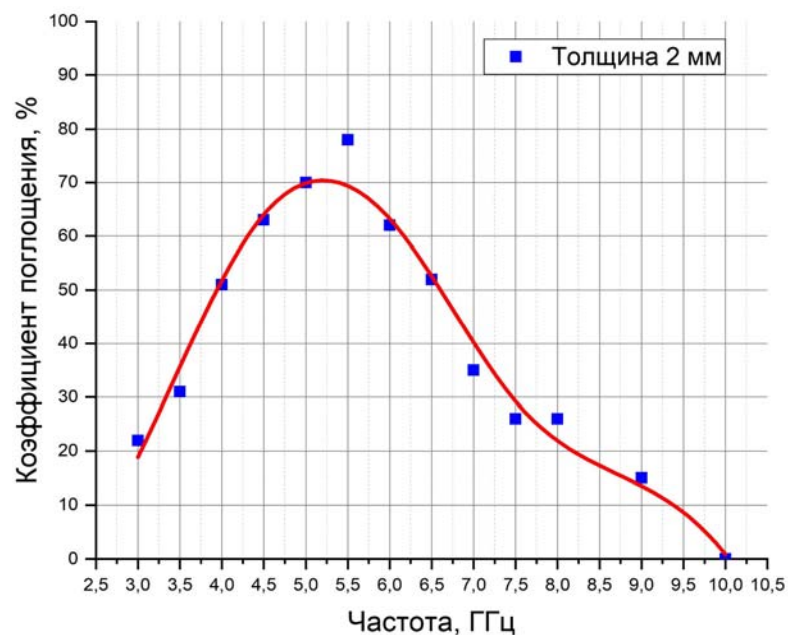


Рис. 5. Радиопоглощающий материал с содержанием рубленого углеродного волокна и металлической окалины толщиной 2 мм

Из приведённых рисунков видно, что радиопоглощающие материалы с рубленым углеродным волокном и карбонильным железом, рубленым углеродным волокном и металлической окалиной имеют экспериментальное поглощение в определённой области частот (см. рис. 2–5). При этом область частот, в которой наблюдается максимальное поглощение зависит от соотношения рубленого углеродного волокна и карбонильного железа или металлической окалины. Такого типа радиопоглощающие материалы необходимо готовить на конкретный узкий диапазон частот, в котором нужно защититься от электромагнитного излучения. Очень интересная зависимость поглощения наблюдается при изменении толщины материала (см. рис. 2–5).

При толщине материала 1 мм поглощение электромагнитного излучения происходит в области более высоких частот (см. рис. 2, 4). При увеличении толщины материала до 2 мм поглощение смещается в область более низких частот (см. рис. 3, 5).

Материалы с карбонильным железом и рубленным углеродным волокном толщиной 1 мм эффективно работают в диапазоне частот 6–9,5 ГГц (см. рис. 2) (поглощение более 50 %). Максимальное поглощение в этом диапазоне происходит на частотах 8–8,5 ГГц. При этом коэффициент поглощения составляет более 80 %. Увеличение толщины материала приводит к тому, что диапазон эффективной работы материала (поглощение более 50 %) смещается в диапазон частот 2,5–5,5 ГГц (см. рис. 3); максимальное поглощение у такого материала наблюдается на частоте 4–4,5 ГГц и составляет более 70 %.

Материалы с металлической окалиной и рубленным углеродным волокном толщиной 1 мм эффективно работают в диапазоне частот 5,75–8 ГГц (поглощение более 50 %) (см. рис. 4); максимальное поглощение (более 80 %) происходит на частоте 7 ГГц. Материалы толщиной 2 мм имеют поглощение более 50 % в диапазоне частот 4–6,5 ГГц (см. рис. 4); максимальное поглощение 70 % происходит на частоте 5–5,5 ГГц.

В целях снижения стоимости радиопоглощающего материала разработан материал с окисленным графитом и металлической окалиной. Результаты исследований такого материала приведены на рис. 6, у этого материала поглощение электромагнитного излучения более 50 % происходит только при толщине 2 мм в диапазоне частот 6,1–7,5 ГГц; максимальное поглощение (около 70 %) наблюдается на частоте 6,5–7,5 ГГц.

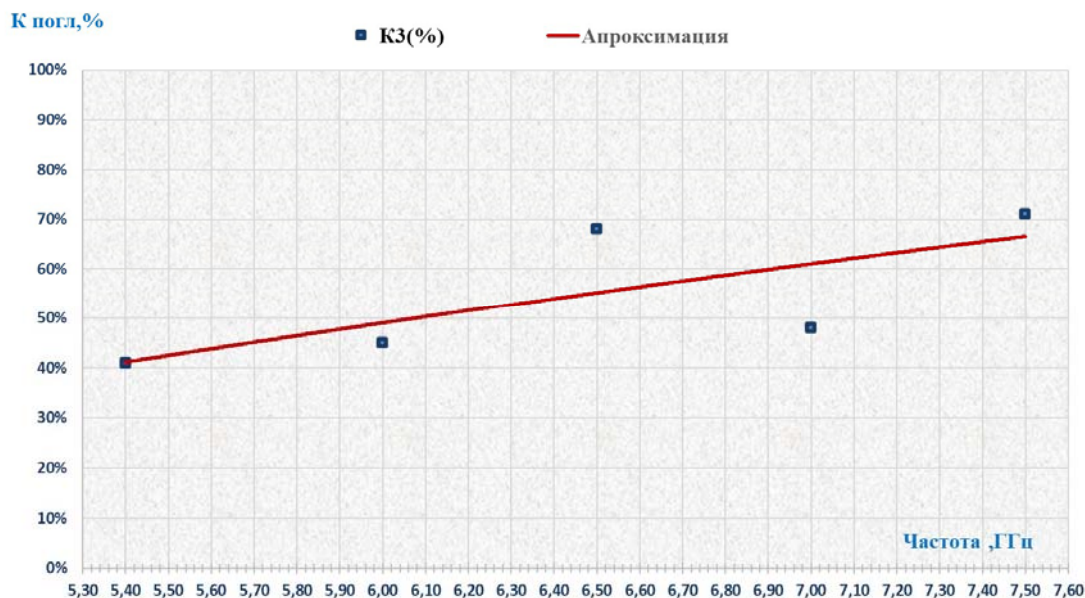


Рис. 6. Радиопоглощающий материал с содержанием окисленного графита и металлической окалины толщиной 2 мм

ВЫВОДЫ

Разработаны эластичные самоклеящиеся радиопоглощающие материалы с коэффициентом поглощения от 50 до 90 %, способные работать в различном диапазоне СВЧ-частот. Материалы имеют высокую адгезионную прочность к металлу, бетону, дюралюминию и стеклу.

Список литературы

1. Григорьев, О.А. Проблемы электромагнитного загрязнения окружающей среды / О.А. Григорьев, Ю.Б. Зубарев, А.С. Прокофьева // Экология. – 2017. – № 2. – С. 17–24.
2. Михайловский, Л.К. Радиопоглощающие бестоковые среды, материалы и покрытия (электромагнитные свойства и практические применения) / Л.К. Михайловский // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники. – 2000. – №9. – С. 21–30.

3. Богуш, В.А. Композитные металлосодержащие волокнистые материалы для гибких экранов электромагнитного излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Богуш; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2000. – 19 с.
4. Криваткин, А.М. Специальные пластмассы для экранирования электромагнитных излучений / А.М. Криваткин, Ю.Т. Сакуненко // Полимерные и композиционные материалы: технологии, оборудование, применение: сб. тез. докл. научн.-практ. конф. / Междунар. специализир. выставка «Индустрия пластмасс – 2006» (Москва, 14 марта 2006 г.). – М.: Изд-во Максима, 2006. – С. 28–30.
5. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, №2. – С. 196–209.
6. Лувцев, Л.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение / Л.В. Лувцев, Г.А. Николайчук, В.В. Петров, С.В. Яковлев // Нанотехника. – 2008. – №2 (14). – С. 36–43.
7. Николайчук, Г. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур / Г. Николайчук, В. Иванов, С. Яковлев // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2010. – №1 (99). – С. 92–95.
8. Никитина, В.Н. Радиоэкранирующие свойства магнетиально-шунгитовых строительных материалов / В.Н. Никитина, Г.Г. Ляшко, Л.Н. Поцелуева // Ежегодник Рос. Нац. Комитета по защите от неионизирующих излучений 2004–2005: сб. тр. – М.: АЛЛАНА, 2006. – С. 109–113.
9. Хачатуров, А.А. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутadiен-стирольного каучука и магнетита / А.А. Хачатуров, А.С. Фионов, В.В. Колесов, Е.Э. Потапов, Е.М. Ильин // РЭНСИТ. – 2019. – Т. 11, №2. – С.189–199.
10. Крюков, А.В. Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ-диапазоне / А.В. Крюков, А.С. Еремеев // РЭНСИТ. – 2020. – №12(3). – С.335–340. – DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
11. Xiangyu, Zheng. Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields / Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 33. – 104498. – ISSN 2352-4928. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>.
12. Retailleau, C. Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials / C. Retailleau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 221. – 109351. – ISSN 0266-3538. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
13. Soto-Oviedo, Mauro A. Antistatic coating and electromagnetic shielding properties of a hybrid material based on polyaniline/organoclay nanocomposite and EPDM rubber / Mauro A. Soto-Oviedo, Olacir A. Araújo, Roselena Faez, Mirabel C. Rezende, Marco-A. De Paoli // Synthetic Metals. – 2006. – Vol. 156, Issues 18–20. – P. 1249–1255. – ISSN 0379-6779. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.09.003>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037967790600213X>).
14. Thomassin, Jean-Michel. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / Jean-Michel Thomassin, Christine Jérôme, Thomas Pardoën, Christian Bailly, Isabelle Huynen, Christophe Detrembleur // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2013. – Vol. 74, Issue 7. – P. 211–232. – ISSN 0927-796X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.06.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X1300048X>).
15. Chang, Yingjie. Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding / Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan // Composites Part B: Engineering. – 2023. – Vol. 260. – 110766. – ISSN 1359-8368. –

URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>).

16. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. В.Н. Бондаренко; отв. за вып. А.А. Левицкий. – Электрон. дан. (31 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016.

17. ГОСТ 30381-95 / ГОСТ Р 50011-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия.

References

1. Grigoriev, O.A. Problems of electromagnetic pollution of the environment / O.A. Grigoriev, Yu.B. Zubarev, A. S. Prokofiev // *Ecology*. – 2017. – No. 2. – P. 17–24.
2. Mikhailovsky, L.K. Radio-absorbing shockless media, materials and coatings (electromagnetic properties and practical applications) / L.K. Mikhailovsky // *Foreign radio electronics. Success is a lie. Radio electronics*. – 2000. – No.9. – P. 21–30.
3. Bogush, V.A. Composite metal-containing fibrous materials for flexible electromagnetic radiation screens: abstract. ... candidate of Technical Sciences / V.A. Bogush; Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. – Minsk, 2000. – 19 p.
4. Krivatkin, A.M. Special plastics for shielding electromagnetic radiation / A.M. Krivatkin, Y.T. Sakunenko // *Polymer and composite materials: technologies, equipment, applications: collection of scientific papers.-practical conference / International specialization. exhibition «Plastics Industry – 2006» (Moscow, March 14, 2006)*. – M.: Maxim Publishing House, 2006. – P. 28–30.
5. Kazantseva, N E. Promising materials for electromagnetic wave absorbers of the ultrahigh frequency range / N.E. Kazantseva, N.G. Ryvkina, I.A. Chmutin // *Radio Engineering and Electronics*. – 2003. – Vol. 48, No. 2. – P. 196–209.
6. Luvtshev, L.V. Multipurpose radio absorbent material urgent based on magnetoengh nanostructure: yield, properties and substitution / L.V. Luvtshev, G.A. Nikolaychuk, V.V. Petrov, S.V. Yakovlev // *Nanotechnology*. – 2008. – №2 (14). – P. 36–43.
7. Nikolaychuk, G. Radio absorbent material, based on nanostructure / G. Nikolaychuk, V. Ivanov, S. Yakovlev // *Fluctronics: Science, Technology, Business*. – 2010. – №1 (99). – P. 92–95.
8. Nikitina, V.N. Radio shielding properties of magnesia-shungite building materials / V.N. Nikitina, G.G. Lyashko, L.N. Potselueva // *Yearbook of Russian National Committee on Protection from Non-ionizing Radiation 2004 – 2005: collection of tr.* – M.: ALLAN Publishing House, 2006. – P. 109–113.
9. Khachaturov, A.A. Functional elastomeric composite materials based on styrene butadiene rubber and magnetite / A.A. Khachaturov, A.S. Fionov, V.V. Kolesov, E.E. Potapov, E.M. Ilyin // *RENSIT*. – 2019. – Vol. 11, No.2. – P.189–199.
10. Kryukov, A.V. New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and an assessment of their absorbing properties in the microwave range / A.V. Kryukov, A.S. Ereemeev // *RENSIT*. – 2020. – No.12(3). – P.335–340. – DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
11. Xiangyu, Zheng. Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields / Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 33. – 104498. – ISSN 2352-4928. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>.
12. Retailleau, C. Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials / C. Retailleau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei // *Composites Science and Technology*. – 2022. – Vol. 221. – 109351. – ISSN 0266-3538. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)

13. Soto-Oviedo, Mauro A. Antistatic coating and electromagnetic shielding properties of a hybrid material based on polyaniline/organoclay nanocomposite and EPDM rubber / Mauro A. Soto-Oviedo, Olacir A. Araújo, Roselena Faez, Mirabel C. Rezende, Marco-A. De Paoli // *Synthetic Metals*. – 2006. – Vol. 156, Issues 18–20. – P. 1249–1255. – ISSN 0379-6779. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2006.09.003>. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037967790600213X)
14. Thomassin, Jean-Michel. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials / Jean-Michel Thomassin, Christine Jérôme, Thomas Pardoën, Christian Bailly, Isabelle Huynen, Christophe Detrembleur // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2013. – Vol. 74, Issue 7. – P. 211–232. – ISSN 0927-796X. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.06.001>. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X1300048X)
15. Chang, Yingjie. Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding / Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 260. – 110766. – ISSN 1359-8368. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X)
16. Modern problems of radio electronics: collection of scientific tr. / scientific ed. V.N. Bondarenko ; rev. for issue A. A. Levitsky. – *Electron. dan.* (31 Mb). – Krasnoyarsk: Sib. feder. Univ., 2016.
17. GOST 30381-95 / GOST R 50011-92. Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic wave absorbers for shielded cameras. General technical conditions.

УДК 691 : 519

DOI 10.54734/20722958_2024_4_48

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

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

Гвоздева Ирина Геннадьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
вычислительные системы»
E-mail: kuzina@pguas.ru

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

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

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

Gvozdeva Irina Gennadievna,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Information
and computing systems»
E-mail: gvozdeva3105@gmail.com

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ, УВЛАЖНЕНИЯ И СУШКИ ОБЪЕМНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Кузина, И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев

Представлены результаты численного моделирования и анализ влияния основных параметров процессов металлизации углеродистых волокон, увлажнения текстильного материала и влагопоглощения в известковом композите на распределение процессов в соответствующих пористых средах. Приведено сравнение расчетных параметров распределения физико-химических реакций в рассматриваемой пористой среде с экспериментальными, показано их соответствие.

Ключевые слова: углеродные волокнистые материалы, пористая среда, трехмерные проточные электроды, математическое моделирование, процессы увлажнения – влагопоглощения, расчет, оптимизация

RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF METALLIZATION, MOISTENING AND DRYING OF VOLUMETRICALLY POROUS MATERIALS

V.V. Kuzina, I.G. Gvozdeva, A.N. Koshev

The results of numerical simulation and certain analysis of the influence of the main parameters of the processes of metallization of carbon-graphite fibers, moistening of textile material and moisture absorption in lime composite on the distributions of the processes in the corresponding porous media are presented. The correspondence of the calculated parameters of the distribution of physicochemical reactions in the considered porous medium to the experimental ones is shown.

Keywords: carbon fibrous materials, porous medium, three-dimensional flow electrodes, mathematical modeling, humidification-moisture absorption processes, calculation, optimization

Численное моделирование процессов металлизации углеграфитовых волокон

На основе описанных математических моделей [1] выполнено математическое моделирование процессов осаждения металлов в проточных трехмерных электродах (ПТЭ) с целью получения композиционных и наноконпозиционных материалов с заданными свойствами, создаваемых на основе углеродных волокнистых материалов (УВМ). Представленные в работе результаты экспериментальных исследований получены профессором В.К. Варенцовым [2, 3] путем модификации поверхностных свойств УВМ определенной марки с целью получения равномерных осадков при металлизации материала электрохимическим способом. Осаждение металлов на предварительно электрохимически обработанные материалы позволяет рассчитывать и использовать эффективные режимы электролиза, что дает возможность получить равномерно распределенные осадки металла по толщине электрода, улучшить структуру, морфологию и состав осадков, а следовательно, и свойства композиционного материала (рис. 1).

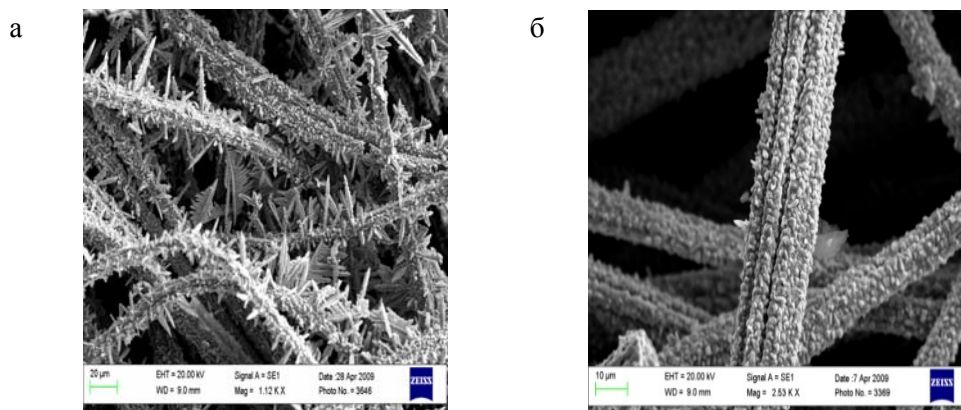


Рис. 1. Микрофотографии осадков меди на исходном (а) и электрохимически модифицированном (б) УВМ

В данной работе приведено решение задачи математического и численного моделирования процесса получения покрытия УВМ марки ВВП-66-95 при гальваническом осаждении серебра из сернокислого тиомочевинного раствора. Для расчетов и экспериментальных исследований использовалась электрохимическая система, характеризующаяся следующими электрохимическими и технологическими параметрами: толщина электрода – 1 см; плотность тока – $0,2 \text{ А/м}^2$, скорость протока раствора – $0,56 \text{ см/с}$; удельная поверхность – $255 \text{ см}^2/\text{см}^3$, удельная электропроводность – $0,03 \text{ См/см}$, пористость – $0,95$; удельная электропроводность раствора – $0,1 \text{ См/см}$; время электролиза – 60 мин; состав электролита: H_2SO_4 – $0,5 \text{ моль/л}$, тиомочевина – 50 г/л , серебро – 76 мг/л . На рис. 2 приведены результаты расчетов и экспериментальные данные распределения металла по толщине ПТЭ. Расчеты выполнены в соответствии с описанной в работе [1] математической моделью (1) – (4).

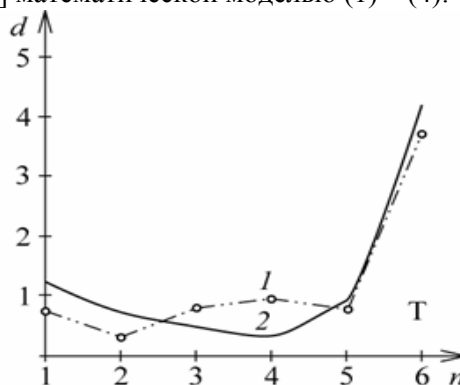


Рис. 2. Распределение осадка серебра по толщине электрода:
1 – эксперимент, 2 – расчет; d – отношение массы металла к массе УВМ; n – номер слоя;
 T – тыльная сторона электрода

Результаты показывают хорошее соответствие друг другу экспериментальных и расчетных кривых распределения серебра по толщине УВМ, что подтверждает эффективность использования математических моделей и алгоритмов расчетов для проведения численных исследований процессов электроосаждения металлов при создании композиционных материалов с определенной морфологией и распределением осадка металла по поверхности волокон УВМ.

Особо отметим, что на поверхность волокон УВМ можно электролитически осаждать наноразмерные частички металлов, что позволяет получать плотные покрытия углеродистых волокон с заданным профилем. В качестве иллюстрации приведем фотографии морфологии осадков платины на углеродистые нити (рис. 3).

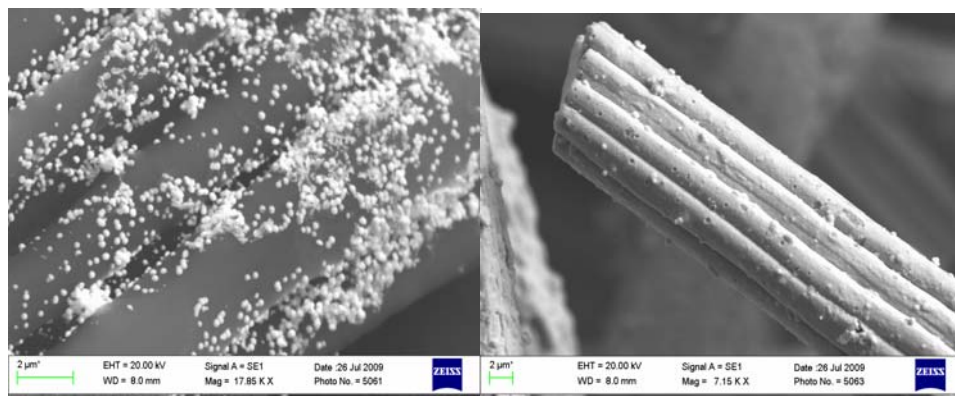


Рис. 3. Микрофотографии осадков платины на УВМ

Следует отметить, что композиционные каталитические материалы на основе металлизированных платиной, серебром или их сплавом углеродистых волокон обеспечивают большую эффективность каталитических процессов окисления Ce(III) в серноокислом растворе и окисления алифатических спиртов и альдегидов, а также сложных минерально-органических конденсатов в водных растворах [3, 4, 5]. Кроме того, такие катализаторы более удобны при их применении в электрохимических реакторах различных конструкций, чем обычно используемый для этих целей активированный уголь.

Численное моделирование процессов увлажнения компактно сформированных текстильных волокон

В работе [1] представлена математическая модель в виде краевой задачи математической физики для расчета распределения относительной влажности в объеме пористого компактно сформированного текстильного материала при его увлажнении влажным воздушным потоком.

В качестве иллюстрации работоспособности алгоритма на рис. 4 приведены результаты расчета изменения относительной влажности воздуха в объеме пористой среды. При этом учтено возможное изменение скорости воздушного потока по мере продвижения в глубину компактного материала, для чего был выбран линейный закон падения линейной скорости потока: $w(x) = \gamma x + \mu$.

Результаты расчетов и экспериментальные данные [6] показывают их достаточную корреляцию. Расхождения в кривых увлажнения в начальных слоях материала могут быть объяснены, например, неравномерным распределением пористости материала, что не учитывалось в используемых модельных представлениях. Результаты (см. рис. 2, 4) показывают, что увеличение скорости движения увлажняющего воздуха способствует более равномерному распределению влаги в объеме увлажняемого материала. В то же время очевидно, что рост интенсивности продувки влажным воздухом компактно сформированного текстильного материала требует увеличения либо мощности вентиляционного устройства, либо пористости материала. Из анализа результатов делаем вывод, что задача выбора технологического режима увлажнения для обеспечения равномерного распределения процесса по толщине компактно сформированного материала может быть сформулирована в виде задачи отыскания

эффективных значений технологических и физических параметров процесса увлажнения.

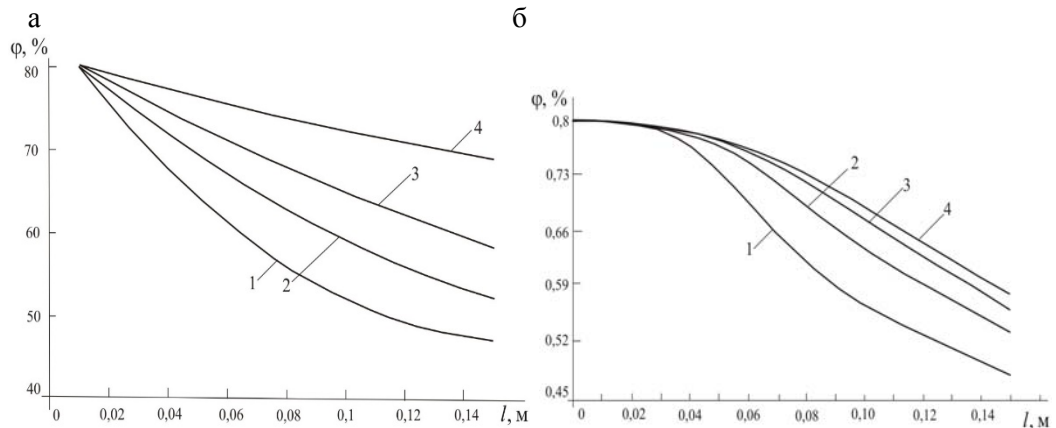


Рис. 4. Влияние начальной скорости потока воздуха v на распределение относительной влажности воздуха в объеме ПС с учетом линейного падения скорости в объеме среды: а – расчетные; б – экспериментальные кривые 1–4, соответственно, при $v = 2, 4, 6, 8$ м/с

Влагопоглощение в пористых строительных материалах

На рис. 5 приведены полученные расчетным и экспериментальным путем данные влагопоглощения для двух пористых материалов: вспененного вермикулитового песка (1) и микросфер алюмосиликатной золы (2). Для численной реализации математической модели (11), описанной в работе [1], использованы следующие значения параметров: $k_2 = 0,016$, $L = 2$ см, $\varphi(0) = 100$, $\varphi(L) = 50$ и коэффициенты диффузии $D_1 = 7,67 \times 10^{-5}$ и $D_2 = 3,43 \times 10^{-5}$ см²/с для соответствующих кривых [7].

Анализ результатов расчетов и экспериментов показывает их достаточно хорошее соответствие, что свидетельствует об эффективности использования математической модели. Данные, представленные на рис. 5, б, позволяют сделать вывод о затруднении проникновения процесса в толщу материала даже при значительно продолжительном времени увлажнения. Задачу определения эффективных значений толщины материала, пористости, времени ведения процесса и пр., обеспечивающих достаточное увлажнение материала, целесообразно решать с использованием математического моделирования и численных расчетов.

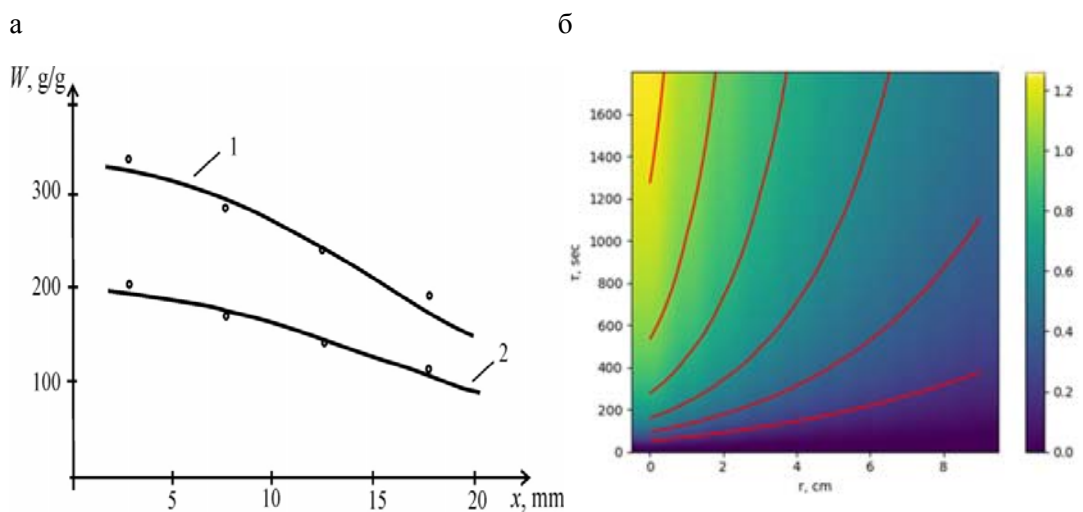


Рис. 5. Распределение содержания влаги в отделочном покрытии: а – расчет во вспененном вермикулитовом песке (кривая 1), в зольных микросферах алюмосиликата (2); точки – эксперимент; б – распределение влаги в объеме пористого материала с течением времени процесса

Результаты расчетов показывают также, что величина коэффициента диффузии влаги в глубину массива материала существенно влияет на скорость и распределение процесса увлажнения пористого материала и может быть использована в качестве фактора управления процессом влагосодержания композита.

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования и рассмотрен определенный анализ влияния основных параметров процессов металлизации углеродных волокон, увлажнения текстильного материала и влагопоглощения в известковом композите на распределение процессов в соответствующих пористых средах.

Показано, что представленные в работе [1] математические модели при заданных значениях параметров процессов, участвующих в соотношениях, определенных экспериментальным или расчетным путем, вполне адекватно описывают закономерности распределения физико-химических реакций в рассматриваемой пористой среде и могут быть использованы для теоретических исследований закономерностей, а также для расчета оптимальных значений технологических параметров рассматриваемых процессов.

Отметим, что для расчетов были разработаны компьютерные программы с использованием математической среды *MathCAD* и языка программирования *Python* с библиотеками/модулями *Numpy*, *Scipy* и *Matplotlib*.

Список литературы

1. Кошев, А.Н. Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах / А.Н. Кошев, В.В. Кузина // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3. – С. 142–147.
2. Варенцов, В.К. Электроосаждение металлов и их оксидов на электрохимически модифицированные трехмерные углеродные материалы / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 616–622.
3. Варенцов, В.К. Электролиз в растворах электролитов – эффективный способ модификации свойств углеродных волокнистых материалов / В.К. Варенцов, В.И. Варенцова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2000. – № 3. – С. 353–362.
4. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: монография / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та архитектуры и строительства, 2015. – 288 с.
5. Варенцов, В.К. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: монография / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та архитектуры и строительства, 2020. – 172 с.
6. Ерёмкин, А.И. Математическое описание закономерностей распределения влаги в объеме компактно сформированного текстильного материала при увлажнении кондиционированным воздухом / А.И. Ерёмкин // Вестник отделения строительных наук РААСН. – 2005. – № 9. – С. 8.
7. Koshev, A.N. Regularities of mass transfer in the finishing layer on the basis of a heat-insulating dry construction mixture in the process of moistening / A.N. Koshev, V.I. Loganina, V.S. Dem'yanova, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 1. – P. 136–141.

References

1. Koshev, A.N. Mathematical modeling of physical and chemical processes in porous / A.N. Koshev, V.V. Kuzina // Regional architecture and engineering. – 2024. – No 3. – P. 142–147.

2. Varentsov, V.K. Electrodeposition of metals and their oxides on electrochemically modified three-dimensional carbon materials / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Surface physicochemistry and protection of materials. – 2017. – V. 53, No 6. – P. 616–622.
3. Varentsov, V.K. Electrolysis in electrolyte solutions – an effective way to modify the properties of carbon fiber materials / V.K. Varentsov, V.I. Varentsova // Chemistry in the interests of sustainable development. – 2000. – No 3. – P. 353–362.
4. Varentsov, V.K. Modern problems of electrolysis and problems of process optimization in reactors with three-dimensional carbon electrodes: monograph / V.K. Varentsov, A.N. Koshev, V.I. Varentsova. – Penza: Publishing house of Penza State University of Architecture and Construction, 2015. – 288 p.
5. 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: Publishing house of Penza State University of Architecture and Construction, 2020. – 172 p.
6. Yeremkin, A.I. Mathematical description of the moisture distribution regularities in the volume of compactly formed textile material at humidification by conditioned air / A.I. Yeremkin // Bulletin of the Department of Building Sciences Russian Academy of Architecture and Building Sciences. – 2005. – № 9. – P. 8.
7. Koshev, A.N. Regularities of mass transfer in the finishing layer on the basis of a heat-insulating dry construction mixture in the process of moistening / A.N. Koshev, V.I. Loganina, V.S. Dem'yanova, M.V. Frolov // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 1. – P. 136–141.

УДК 666.774:669.054

DOI 10.54734/20722958_2024_4_54

*Самарский государственный
экономический университет*Россия, 443090, г. Самара,
ул. Советской Армии, 141**Абдрахимов Владимир Закирович**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Землеустройство и экология»,
советник РААСН
E-mail: 3375892@mail.ru*Samara State University of Economics*Russia, 443090, Samara, 141,
Sovetskaya Army St.**Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Land Management and
Ecology», Advisor to the RAASN
E-mail: 3375892@mail.ru

РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОУПОРОВ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННОГО ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ

В.З. Абдрахимов

Показано, что введение в составы керамических масс нанотехногенного шлама щелочного травления повышает их кислотостойкость, так как после обжига исследуемый шлам значительно обогащается глиноземом ($Al_2O_3 > 70\%$). Предложен метод получения кислотоупоров на основе обогащения шлама щелочного травления глиноземом от 47,29 до 72,48 %. На данный способ получен патент РФ №2394790. Из отвалного техногенного сырья без применения естественного сырья с помощью запатентованного метода получены кислотоупоры.

Ключевые слова: кислотоупоры, ГЦИ, нанотехногенный шлам, техногенное сырье металлургии

RECYCLING OF METALLURGICAL WASTE IN THE PRODUCTION OF ACID RESISTANCE WITHOUT THE USE OF TRADITIONAL NATURAL RAW MATERIALS

V.Z. Abdrakhimov

The introduction of nanotechnogenic alkaline etching sludge into the compositions of ceramic masses increases acid resistance, since after firing the studied sludge is significantly enriched with alumina ($Al_2O_3 > 70\%$). A method of obtaining acid-resistant products based on the enrichment of alkali etching sludge with alumina from 47.29 to 72.48% is proposed. RF patent No. 2394790 has been got for this method. Acid-resistant materials are obtained from waste man-made raw materials without the use of natural raw materials using a patented method.

Keywords: acid-resistant materials, HCl, nanotechnogenic sludge, technogenic raw materials of metallurgy

Введение

Экологическая ситуация. В настоящее время большие пространства, относящиеся к промзонам, оказались под влиянием металлургических производств [1–2]. Эти территории охватывают не только районы с высокой численностью населения, но и земли сельскохозяйственного назначения, участки с водными источниками, используемыми в потребительских целях, и территории, предназначенные для строительства жилых и производственных зданий и сооружений [2–5]. В результате экологическая ситуация промышленно-урбанизированных регионов значительно осложняется, что требует междисциплинарных исследований. Кроме того, металлургические предприятия выбрасывают в атмосферу значительные объемы канцерогенных веществ, что вызывает загрязнение природной среды [5–7].

Кислотоупоры. Керамические материалы огне- и кислотоупорного направления: кирпичи, плитки и трубы – пригодны для применения их в агрессивных средах. В работах [8–11] показано, что ротация кислотоупорного кирпича на кислотоупорную плитку будет способствовать уменьшению потребления сырьевых материалов в 2,5–3 раза. Кислотоупорные плитки по сравнению с кирпичом более качественно (из-за меньшей толщины) высушивают и обжигают, а это означает, что время на эти операции будет сокращено.

Кислотоупорная плитка – это надежная защита работающего персонала от воздействия химически агрессивных и активных ингредиентов. Кислотоупорными плитками можно продуктивно заменять дорогостоящее металлическое оборудование, так как эти изделия гораздо дешевле и надежнее по отношению к коррозии металлов.

Для производства качественных кислотоупоров требуются алюмосиликатные высококачественные сырьевые ингредиенты (пластичные – связующие, непластичные – отощители) с повышенным содержанием оксида алюминия (пластичные $Al_2O_3 > 20\%$, непластичные $Al_2O_3 > 50\%$), но такие сырьевые ингредиенты либо отсутствуют, либо на грани истощения [12, 13].

Поэтому злободневным оказывается вопрос ротации природного традиционного сырья на сырье техногенного происхождения с повышенным содержанием глинозема ($Al_2O_3 > 70\%$), используемое в качестве отощителя, что повысит технические характеристики кислотоупоров [12, 14].

Рециклинг техногенного сырья в генерацию кислотоупорной продукции будет способствовать исключению финансовых издержек на геологоразведочные изыскания, очищению огромных пространств от воздействия неблагоприятных антропогенных мутагенов.

Безопасность экологических систем, как зафиксировано в директиве ЕС 2008/98/ЕС, в значительной степени станет результативной, если из техногенного сырья в результате рециклинга получится новый продукт, полезный для человечества [15].

Постановка задачи. Искрапаемость запасов качественных алюмосиликатных сырьевых ингредиентов создала необходимость организовать ротацию по замене традиционного природного материала на техногенное сырье. Такой инструмент, повышающий безопасность окружающей среды, имеется у передовых стран.

Цель работы: проанализировать влияние термообработанного при $800^\circ C$ шлама щелочного травления на технологические и технические показатели кислотоупоров на базе ГЦИ (глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) без мобилизации сырья традиционного естественного образования.

Методы исследования

Для установления поэлементных химических составов техногенного сырья использовалось передовое оборудование, идентичное показанному в статьях [1, 16], – японский электронный растровый микроскоп JSM 6390A фирмы Jeol. Для петрографического исследования применялись аншлифы, пропускающие свет, шлифы, иммерсионные жидкости и микроскопы МИН-8 и МИН-7. Технические показатели кислотоупоров фиксировали согласно ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные», марка КШ (кислотоупорные шамотные).

Экспериментальная часть

Сырьевые материалы. Химические составы используемых компонентов ГЦИ и отощителей (шамота и шлама) показаны в табл. 1–2 и на рис. 1–2.

Усредненный оксидный химический состав компонентов

Ресурсный материал	Массовое содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
1. ГЦИ	59,59	22,43	6,74	1,28	1,54	1,58	7,04
2. Шамот из ГЦИ	61,88	25,18	7,58	1,54	1,89	1,93	—
3. Шлам щелочного травления	1,30	47,29	—	1,38	6,45	9,48	34,1
4. Прокаленный при 800°С шлам	1,72	72,48	—	2,04	9,48	14,28	—

Примечание: П.п.п. — потери при прокаливании, $R_2O = K_2O + Na_2O$

Т а б л и ц а 2

Поэлементный химический состав компонентов

Ресурсный материал	Массовое содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	K	Ca	Fe
1. ГЦИ	2,18	51,26	0,26	0,54	15,57	24,8	0,32	0,2	4,87
2. Шамот из каолиновой глины	—	63,12	0,20	0,38	10,18	21,87	0,15	2,12	1,98
3. Прокаленный при 800°С шлам щелочного травления	—	40,81	5,45	6,42	43,32	0,20	3,58	0,22	—

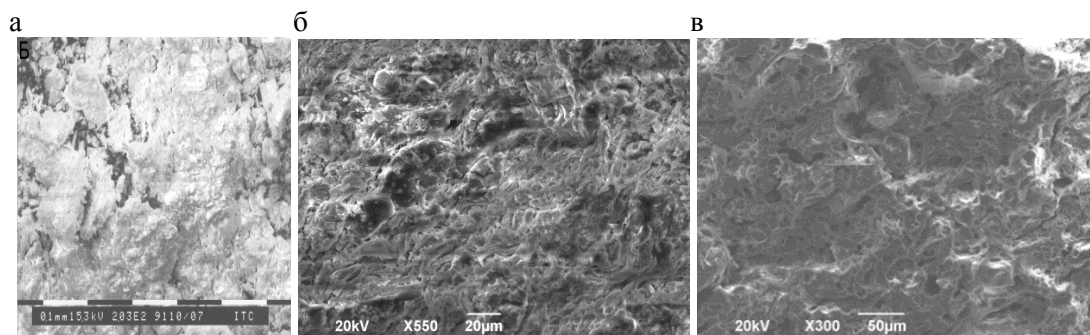


Рис. 1. Электронное фото (микроструктура) ресурсных материалов:
а – ГЦИ; б – прокаленный при 800°С шлам щелочного травления; в – шамот.
Увеличение: а – х500; б – х550; в – х300

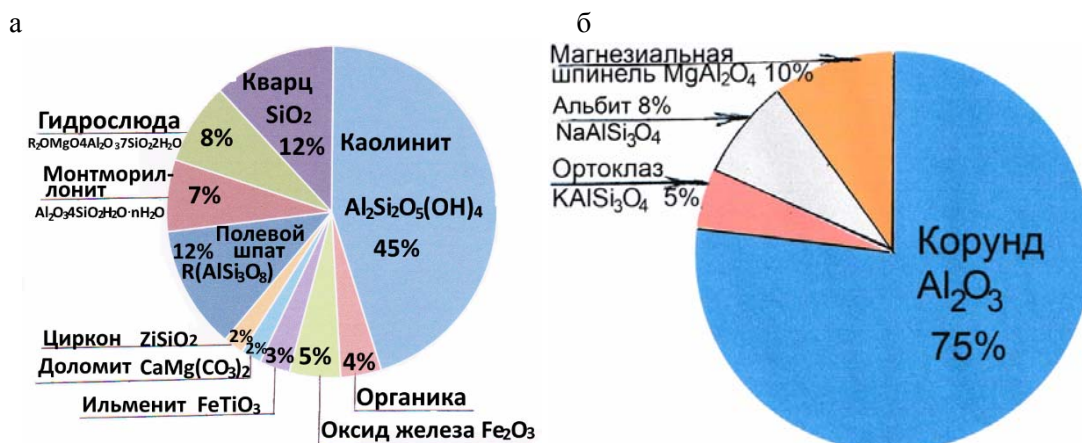


Рис. 2. Минералогический состав ресурсных материалов:
а – ГЦИ; б прокаленный при 800°С шлам щелочного травления

Глинистый ингредиент (ГЦИ). Получение ГЦИ организуется методом отсоединения руды металлургической от глинистого ингредиента с привлечением оборудования дезинтеграции, как было показано в работе [1]. Исследуемый ингредиент (ресурсный материал – ГЦИ) вследствие мокрогравитационного способа обогащения руды трансформируется в гомогенный (однородный) по химическому и гранулометрическому составу сырьевой материал.

Шамот. Для получения шамота ГЦИ обжигалась до влагопоглощения менее 5 % при температуре 1200°C. Шамот выступает в качестве отощителя, который при термообработке керамических изделий создает каркас. Как видно из данных табл. 1, при термообработке ГЦИ «на шамот» последний обогащается глинозёмом (Al_2O_3) с 22,43 до 25,18 %.

Шлам щелочного травления. Выкристаллизовывается шлам щелочного травления алюминия благодаря совместному преобразованию алюминийсодержащих сплавов с щелочью NaOH [17].

Из продуцированных травильных растворов после генерации щелочей глиноземсодержащий ингредиент оседает на днище ванны и последовательно выкристаллизовывается. Такие шламы, подвергшиеся кристаллизации, имеют отличительную особенность: это высокое содержание Al_2O_3 – 47,29 % и R_2O – 9,48 % (см. табл. 1).

В основном Al_2O_3 проявляется в виде α -модификации, которая принадлежит к высокотемпературным оксидам (огнеупорность более 2000°C) и тождественна минералу природного происхождения – корунду [8, 12, 14, 18–20]. Выполненные в НИИ (Ленинградская область, г. Гатчина) анализы с применением ядерных элементов определили исследуемые шламы в группу нанотехногенных (размер от 100 до 500 нм) [17, 18, 20].

Прокаленный шлам щелочного травления. С целью повышения содержания оксида алюминия с 47,29 % до 72,48 % шлам обжигался при температуре 800°C (см. табл. 1) [18–21]. Получен патент на способ обогащения различных шламов с использованием термообработки [22]. Печь для обжига шлама показана на рис. 3.

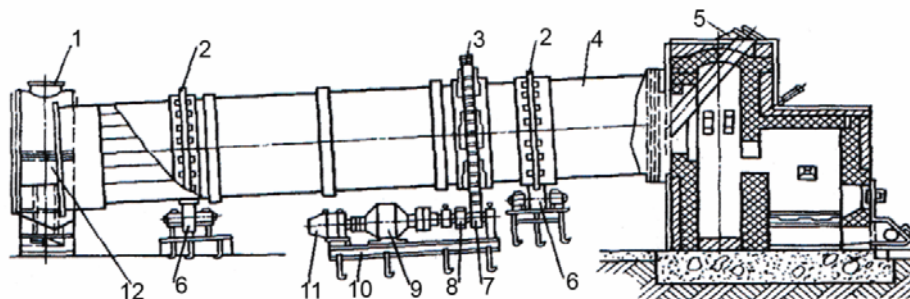


Рис. 3. Вращающаяся печь:

- 1 – патрубок; 2 – бандаж; 3 – венцовая шестерня; 4 – сварной стальной цилиндр;
5 – загрузочная тетка; 6 – опорный ролик; 7 – подвенцовая шестерня; 8 – зубчатая пара;
9 – редуктор; 10 – сварная плита; 11 – электродвигатель; 12 – разгрузочная камера

Исследования авторов работ [18–21] продемонстрировали, что возрастание Al_2O_3 в керамических массах стимулирует для отформованных и высушенных полуфабрикатов рост прочности, а у термообработанных образцов повышаются еще и кислотостойкость, и термическая стойкость. Кроме того, прокаленный при 800°C шлам менее энергозатратен по отношению к обжигу глинистого компонента на шамот при температуре 1200°C.

Получение кислотоупорных плиток

Утилизация техногенного сырья металлургии осуществлялась при создании кислотоупорных плиток марок КШ и ТКШ [12, 14]. Составы для получения кислотоупорных материалов представлены в табл. 3.

Составы и показатели керамических масс и полуфабриката

Ресурсный материал	Содержание компонентов, мас. %		
	1	2	3
1. ГЦИ	100	60	60
2. Шамот из обожженной ГЦИ	–	40	–
3. Прокаленный при 800°C шлам щелочного травления	–	–	40
Показатели керамической массы и полуфабриката			
Пластичность массы (шихты)	22	11	11
Усадка высушенной плитки (полуфабрикат), %	6,8	4,8	4,8

Сырьевые компоненты диспергировали до прохождения сквозь сита №01 (размеры ячейки сита 1×1 мм); затем согласно рецепту (см. табл. 3) гомогенизировали шихту тщательным перемешиванием компонентов до гомогенной консистенции, после чего из полученной массы изготавливали плитки размером 100×100×20 мм, которые высушивали и обжигали при 1250 и 1300°C. В табл. 4 показаны технические характеристики кислотоупорных образцов.

Химические, физико-механические и термические характеристики кислотоупорных плиток

Показатели	Составы			ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные» Марка КШ (кислотоупорные шамотные)
	1	2	3	
Температура обжига 1250°С				
1. Водопоглощение, %	4,2	4,2	3,6	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	96,5	96,8	98,3	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	57,2	60,1	63,5	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	37,4	37,8	43,4	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	57	59	68	Не менее 20
6. Термическая стойкость, теплосмены	3	5	7	Не менее 5
Температура обжига 1300°С				
1. Водопоглощение, %	3,1	3,0	2,5	Менее 5,0
2. Кислотостойкость, %	97,8	98,3	98,8	Не менее 98,0
3. Предел прочности при сжатии, МПа	63,8	69,4	73,3	Не менее 50
4. Предел прочности при статическом изгибе, МПа	41,4	43,7	48,2	Не менее 25
5. Морозостойкость, циклы	58	69	75	Не менее 20
6. Термическая стойкость, теплосмены	4	5	8	Не менее 5
Пористость, %				
открытая	7,19	6,53	6,05	—
закрытая	2,86	3,82	3,98	
общая	10,05	10,35	10,03	

Обсуждение результатов

Термообработанные кислотоупорные плитки состава №1 при 1250 и 1300 °С, как видно из данных табл. 4, не отвечают положению нормативного документа (ГОСТ) по кислотостойкости и термической стойкости.

Использование в составе, состоящем только из ГЦИ, оптимизированного количества шамота (40 %, состав №2, табл. 3 и 4) дает возможность произвести кислотоупорную продукцию, отвечающую всем требованиям ГОСТа, включая кислотостойкость и термическую стойкость, но только при температуре термической обработки не ниже 1300°С. Под оптимизированным количеством шамота (отошителя) мы понимаем определенное содержание отошителя, при котором число пластичности полученной массы релаксирует с 22 до 11 (минимум), в противном случае на плитках фиксируются трещины.

Замена в ГЦИ шамота на прокаленный при 800°С шлам щелочного травления заметно повышает кислотостойкость, термостойкость и все остальные основные показатели, как как исследуемый шлам включает избыточное содержание глинозёма ($Al_2O_3 > 70\%$, см. табл. 1) в виде корунда, который являлся одним из самых прочных минералов, содержащихся в кислотоупорных керамических материалах.

Выводы

1. Исследования показали, что термообработанные в интервале температур 1250–1300°С образцы только из ГЦИ без отошителей с требованиями ГОСТа по термостойкости и кислотостойкости не согласовываются.

2. Установлено, что включение в состав керамических масс на основе ГЦИ 40 % шамота при термообработке 1300°С придает сформованным образцам высокие показатели, отвечающие требованиям ГОСТа.

3. Выявлено, что рециклинг отходов металлургического производства, содержащих 60 % ГЦИ и 40 % шлама, в продукты с кислотоупорными характеристиками, термообработанные при 1300°С, может быть очень продуктивным, поскольку показатели полученных материалов выше требуемых ГОСТом.

Список литературы

1. Абдрахимов, В.З. Рециклинг отходов металлургии без применения природных традиционных материалов в производство кислотоупорных материалов / В.З. Абдрахимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – №2. – С. 21–28. – DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28.
2. Коряков, В.Е. Влияние предприятий металлургической промышленности на окружающую среду и здоровье человека / В.Е. Коряков, А.А. Шишкина, П.А. Шишкина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – №7. – С. 275–278.
3. Patel, A. Integrating biometallurgical recovery of metals with biogenic synthesis of nanoparticles / A. Patel, J. Enman, A. Gulkova, P.I. Guntoro, A. Dutkiewicz, Y. Ghorbani, L. Matsakas // Chemosphere. – 2020. – No. 263. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128306>.
4. Zhang, Y. Successful isolation of a tolerant co-flocculating microalgae towards highly efficient nitrogen removal in harsh rare earth element tailings (REEs) wastewater / Y. Zhang, Z. Xiong, L. Yang, Z. Ren, P. Shao, H. Shi, X. Luo // Water Research. – 2019. – No. 166. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115076>.
5. Politaeva, N.A. Microalgae biotechnology multiple use of chlorella sorokiniana / N.A. Politaeva, Y.A. Smyatskaya, I.V. Dolbnya, D.S. Sobgaida // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – 2020. – P. 252–261.
6. Коряков, В.Е. Влияние предприятий металлургической промышленности на окружающую среду и здоровье человека / В.Е. Коряков, А.А. Шишкина, П.А. Шиш-

кина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – №7. – С.275–278.

7. Говорушко, С.М. Влияние цветной металлургии на окружающую среду / С.М. Говорушко // География в школе. – 2018. – №6. – С. 3–7.

8. Абдрахимова, Е.С. Рециклинг шлака от выплавки ферротитана в производство сейсмостойкого кирпича на основе бейделлитовой глины / Е.С. Абдрахимова // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, №7. – С. 32–36. – DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-32-36

9. Кальнер, В.Д. Экологически ориентированная среда обитания – интегральный критерий качества жизни / В.Д. Кальнер // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, №11. – С. 50–54.

10. Кряжев, А.М. Целлюлозно-бумажное производство: устойчивое развитие и формирование экономики замкнутого цикла / А.М. Кряжев, Т.В. Гусев, И.О. Тихонова, Д.П. Очеретенко, Р. Алмгрен // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, №11. – С. 48–53.

11. Гаприндашвили, Г.П. Кислотоупорные керамические материалы с применением промышленных отходов / Г.П. Гаприндашвили, М.К. / Кекеладзе / Стекло и керамика. – 1988. – №1. – С. 21–23.

12. Абдрахимова, Е.С. Физико-химические процессы при обжиге кислотоупоров: монография / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. – СПб.: Недра, 2003. – 273 с.

13. Дадыкин, В.С. Методика расчета необходимого прироста запасов в управлении воспроизводством минерально-сырьевой базы / В.С. Дадыкин, О.В. Дадыкина // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2019. – №3. – С. 54–57.

14. Абдрахимова, Е.С. Основы технической керамики: монография / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов. – Усть-Каменогорск: Восточно-Казахстанский государственный технический университет, 2001. – 161 с.

15. Дубовик, О.Л. Реформа Европейского Законодательства об отходах / О.Л. Дубовик // Российское право: образование, практика, наука. – 2010. – №5–6. – С. 80–84.

16. Абдрахимова, Е.С. Исследование фазового состава керамического материала возрастом более ста лет / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Химическая технология. – 2023. – №2. – С. 42–48. – DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-42-48

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

18. Абдрахимова, Е.С. Влияние нанотехногенного алюмощелочного шлака на фазовый состав, физико-механические и химические показатели сейсмостойкого кирпича / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Химическая технология. – 2022. – №9. – С. 392–398. – DOI: 10.31044/1684-5811-2022-23-9-392-398

19. Рывтин, В.М. Феррохромовые алюминотермические шлаки – техногенное сырье многофункционального применения. Часть 1. Вещественный состав и свойства феррохромовых шлаков / В.М. Рывтин, В.А. Перепелицын, А.А. Понамаренко, С.И. Гильванг // Новые огнеупоры. – 2017. – №10. – С. 8–14.

20. Хлыстов, А.И. Высокоглиноземистое шламоподобное сырье – современный комплексный модификатор жаростойких вяжущих и бетонов на их основе / А.И. Хлыстов, М.Н. Баранова, С.В. Соколова // Огнеупоры и техническая керамика. – 2018. – №7–8. – С. 17–24.

21. Абдрахимова, Е.С. Влияние нанотехногенного высокоглиноземистого сырья на физико-механические показатели и фазовый состав кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. – 2021. – №8. – С. 53–61.

22. Патент №2394790 Российская Федерация. RU. МПК C04B 33/138. Способ получения кислотоупорных плиток. / Абдрахимов В.З. – Оpubл. 20.07.2010. Бюл. 20.

References

1. Abdrakhimov, V.Z. Recycling of metallurgy waste without the use of natural traditional materials in the production of acid-resistant materials / V.Z. Abdrakhimov // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. – 2023. – No.2. – P. 21–28. – DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28.
2. Koryakov, V.E. Influence of metallurgical industry enterprises on the environment and human health / V.E. Koryakov, A.A. Shishkina, P.A. Shishkina // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2019. – No.7. – P. 275–278.
3. Patel, A. Integrating biometallurgical recovery of metals with biogenic synthesis of nanoparticles / A. Patel, J. Enman, A. Gulkova, P.I. Guntoro, A. Dutkiewicz, Y. Ghorbani, L. Matsakas // Chemosphere. – 2020. – No. 263. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128306>.
4. Zhang, Y. Successful isolation of a tolerant co-flocculating microalgae towards highly efficient nitrogen removal in harsh rare earth element tailings (REEs) wastewater / Y. Zhang, Z. Xiong, L. Yang, Z. Ren, P. Shao, H. Shi, X. Luo // Water Research. – 2019. – No. 166. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115076>.
5. Politaeva, N.A. Microalgae biotechnology multiple use of chlorella sorokiniana / N.A. Politaeva, Y.A. Smyatskaya, I.V. Dolbnya, D.S. Sobgaida // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – 2020. – P. 252–261.
6. Koryakov, V.E. Influence of metallurgical industry enterprises on the environment and human health / V.E. Koryakov, A.A. Shishkina, P.A. Shishkina // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2019. – No.7. – P. 275–278.
7. Govorushko, S.M. Influence of non-ferrous metallurgy on the environment / S.M. Govorushko // Geography at school. – 2018. – No. 6. – P. 3–7.
8. Abdrakhimova, E.S. Recycling of slag from ferrotitanite smelting into the production of earthquake-resistant bricks based on beidellite clay / E.S. Abdrakhimova // Ecology and industry of Russia. – 2021. – Vol. 25, No. 7. – P. 32–36. – DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-32-36
9. Kalner, V.D. Ecologically oriented habitat – an integral criterion of quality of life / V.D. Kalner // Ecology and industry of Russia. – 2019. – Vol. 23, No. 11. – P. 50–54.
10. Kryazhev, A.M. Pulp and paper production: sustainable development and the formation of a closed-cycle economy / A.M. Kryazhev, T.V. Gusev, I.O. Tikhonova, D.P. Ocheretenko, R. Almgren // Ecology and industry of Russia. – 2020. – Vol. 24, No. 11. – P. 48–53.
11. Gaprindashvili, G.P. Acid-resistant ceramic materials with the use of industrial waste / G.P. Gaprindashvili, M.K. Kekelidze // Glass and ceramics. – 1988. – No.1. – P. 21–23.
12. Abdrakhimova, E.S. Physico-chemical processes in the firing of acid-resistant materials / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov. – St. Petersburg: Nedra, 2003. – 273 p.
13. Dadykin, V.S. Methodology for calculating the necessary increase in reserves in the management of reproduction of the mineral resource base / V.S. Dadykin, O.V. Dadykina // Bulletin of Samara State University of Economics. – 2019. – No.3. – P. 54–57.
14. Abdrakhimova, E.S. Fundamentals of technical ceramics / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov. – Ust-Kamenogorsk: East Kazakhstan State Technical University, 2001. – 161 p.
15. Dubovik, O.L. Reform of the European Legislation on waste / O.L. Dubovik // Russian law: education, practice, science. – 2010. – No.5–6. – P. 80–84.
16. Abdrakhimova, E.S. Investigation of the phase composition of ceramic material aged more than a hundred years / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Chemical technology. – 2023. – No.2. – P. 42–48. – DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-42-48
17. Khlystov, A.I. Heat-resistant concrete based on industrial waste of the Samara region: monograph / A.I. Khlystov. – Samara: ASA, SamSTU, 2017. – 171 p.
18. Abdrakhimova, E.S. The influence of nanotechnogenic aluminum-alkali sludge on the phase composition, physico-mechanical and chemical parameters of earthquake-resistant bricks / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Chemical technology. – 2022. – No.9. – P. 392–398. – DOI: 10.31044/1684-5811-2022-23-9-392-398

19. Rytvin, V.M. Ferrochrome aluminothermal slags are technogenic raw materials of multifunctional application. Part 1. The material composition and properties of ferrochrome slags / V.M. Rytvin, V.A. Perepelitsyn, A.A. Ponamarenko, S.I. Gilvang // New refractories. – 2017. – No. 10. – P. 8–14.

20. Khlystov, A.I. High-alumina sludge-like raw materials – a modern complex modifier of heat-resistant binders and concretes based on them / A.I. Khlystov, M.N. Baranova, S.V. Sokolova // Refractories and technical ceramics. – 2018. – No.7–8. – P. 17–24.

21. Abdrakhimova, E.S. Influence of nanotechnogenic high-alumina raw materials on physico-mechanical parameters and phase composition of acid-resistant materials / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Novye ognepory. – 2021. – No.8. – P. 53–61.

22. Patent No. 2394790 Russian Federation. RU. IPC C04B 33/138. A method for producing acid-resistant tiles / Abdrakhimov V.Z. – Publ. 20.07.2010. Byul. 20.

УДК 666.972

DOI 10.54734/20722958_2024_4_63

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

Тараканов Олег Вячеславович,
доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Управление
территориями»
E-mail: tarov60@mail.ru

*Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Россия, 630008, г. Новосибирск,
ул. Ленинградская, д. 113,
тел.: +7 (383) 266-41-25,
факс: +7 (383) 266-40-83

Ильина Лилия Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
директор Института цифровых
и инженерных технологий
E-mail: nsklika@mail.ru

Гичко Николай Олегович,
старший преподаватель кафедры
«Технологии и организация строительства»
E-mail: gichko@sibstrin.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

Tarakanov Oleg Vyacheslavovich,
Doctor of Sciences, Professor,
Decan of faculty «Management of territories»
E-mail: tarov60@mail.ru

*Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering (Sibstrin)*

Russia, 630008, Novosibirsk,
113, Leningradskaya St.,
tel.: +7 (383) 266-41-25,
fax: +7 (383) 266-40-83

Ilina Lilia Vladimirovna,
Doctor of Sciences, Professor, Director of the
Institute of Digital and Engineering
Technologies
E-mail: nsklika@mail.ru

Gichko Nikolai Olegovich,
Senior lecturer of the Department
«Technology and Organization of
Construction»
E-mail: gichko@sibstrin.ru

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МИКРОСТРУКТУРУ, КИНЕТИКУ ТВЕРДЕНИЯ И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Тараканов, Л.В. Ильина, Н.О. Гичко

Определены основные требования к технологии бетонных работ в условиях отрицательных температур с использованием комплексных противоморозных добавок. Проанализирован характер влияния модификаторов на формирование гидратных фаз цементного камня. Приведены экспериментальные данные о влиянии противоморозных добавок для «холодного» бетона на кинетику твердения. Показана необходимость использования технологий многофункциональных бетонов нового поколения при зимнем бетонировании с учетом возможности интенсивного набора прочности в период 1-3 суток.

Ключевые слова: бетон, твердение при отрицательных температурах, противоморозные добавки, микроструктура, пластическая прочность, кинетика твердения, бетоны нового поколения

THE EFFECT OF NEGATIVE TEMPERATURES ON THE MICROSTRUCTURE, HARDENING KINETICS AND STRENGTH OF CEMENT MATERIALS

O.V. Tarakanov, L.V. Ilyina, N.O. Gichko

The basic requirements for the technology of concrete work in conditions of negative temperatures using complex antifreeze additives have been determined. The nature of the effect of the modifiers on the formation of hydrate phases of cement stone is analyzed. Experimental data on the

effect of antifreeze additives for «cold» concrete on the kinetics of hardening are presented. The necessity of using technologies of multifunctional concretes of a new generation in winter concreting is shown, taking into account the possibility of intensive strength gain in the period of 1-3 days.

Keywords: concrete, hardening at subzero temperatures, antifreeze additives, microstructure, plastic strength, hardening kinetics, new generation concretes

В настоящее время в России интенсивно развивается жилищное и промышленное строительство, в том числе в условиях северных территорий. В связи с этим повышение эффективности возведения бетонных и железобетонных конструкций при отрицательных температурах является одной из важнейших проблем строительного производства.

Повышение эффективности зимнего бетонирования может быть достигнуто за счет следующих мероприятий:

- внедрения технологий многофункциональных бетонов нового поколения с быстрым набором прочности в период 1-3 суток;
- оптимизации составов комплексных противоморозных добавок по критериям воздействия на формирование ранней структуры и прочности бетона;
- разработки технологических основ зимнего бетонирования с учетом механизмов действия противоморозных добавок для «теплого» и «холодного» бетона.

В современных условиях в строительное производство интенсивно внедряются технологии химического модифицирования бетонов, позволяющие получать высокотехнологичные бетонные смеси и бетоны с высокими показателями технических характеристик и долговечности.

Появление широкой номенклатуры химических добавок – это положительный фактор, поскольку предоставляется возможность выбора модификаторов для бетонных смесей и бетонов. С другой стороны, в огромном количестве добавок достаточно трудно разобраться без понимания основных механизмов их действия. Для многокомпонентных органоминеральных добавок этот вопрос становится еще более сложным. Химические модификаторы с начала водозатворения оказывают влияние на процессы растворения безводных фаз цемента, скорость и характер формирования коагуляционных и кристаллизационных процессов и в конечном счете на многие физико-механические свойства и долговечность цементных материалов. В процессе эксплуатации в цементной системе могут протекать процессы вторичной гидратации и перекристаллизации гидратов, в результате чего в теле бетона могут возникать структурные напряжения и микротрещины, которые часто становятся причиной последующих коррозионных процессов и разрушения бетона [1-4]. Химические добавки особенно в условиях зимнего бетонирования играют важнейшую роль в процессах гидратации и твердения.

Известно, что твердение цементных растворов и бетонов замедляется при низких положительных и небольших отрицательных температурах и практически прекращается при замерзании жидкой фазы бетона. Вместе с тем следует отметить, что гидратация может продолжаться лишь в тонких капиллярах, в которых вода не замерзает при температуре минус 30°C и ниже. В большинстве случаев при температурах минус 5-10°C твердение бетона практически прекращается.

Бетоны, подвергаемые замораживанию в раннем возрасте, обладают в последующем более низкими физико-механическими характеристиками по сравнению с бетонами, достигшими критической прочности до замораживания. В связи с этим одной из основных задач в технологии зимнего бетонирования является обеспечение условий твердения на морозе, при которых влияние отрицательных температур становится минимальным.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов зимнего бетонирования является применение умеренных противоморозных добавок при обеспечении необходимых условий твердения бетона на морозе различными способами (прогрев, поверхностная защита и т.д.). В большинстве случаев противомо-

розные добавки являются комплексными, в их состав входят пластификаторы, позволяющие снизить водопотребность бетонных смесей, и противоморозные компоненты.

С учетом возможных резких перепадов отрицательных температур на строительной площадке и возможности технологических нарушений в процессе ухода за бетоном описанный выше способ зимнего бетонирования подвержен значительным рискам. Более надежным способом является применение чисто противоморозных компонентов (в большинстве случаев это электролиты), позволяющих снизить температуру замерзания жидкой фазы бетона, а также комплексных смесей [5–7]. Однако в этом случае резко возрастает дозировка добавок, а отдельные модификаторы, например на основе хлористых солей, имеют существенные ограничения по применению вследствие опасности коррозии стальной арматуры бетона. В этом случае наиболее эффективными добавками являются нитраты, нитриты, ацетаты и формиаты натрия и кальция. Поташ в большинстве случаев приводит к потере технологических свойств и раннему схватыванию бетона.

Известно, что наиболее эффективными добавками, способными понизить температуру замерзания жидкой фазы бетона, являются неорганические вещества, и чем ниже значение их молекулярной массы, тем в большей степени они способны понизить температуру замерзания жидкой фазы бетона.

Важным фактором при назначении вида и дозировок противоморозных добавок, входящих в состав комплексных смесей, является оценка их влияния на формирование кристаллизационных структур цементного камня и состав продуктов гидратации, что во многом определяет кинетику начального структурообразования и последующего твердения. Известно, что такие вещества, как хлористые соли, нитраты, ацетаты и формиаты натрия и кальция, активно участвуют в формировании гидратов цементного камня и способствуют повышению плотности, прочности и долговечности, снижению пористости цементных материалов.

Немаловажное значение имеет характер влияния противоморозных добавок на состав продуктов гидратации и формирование структуры цементных материалов.

Ранее проведенные исследования показали [7], что период ускорения гидратации цементных растворов с добавками, содержащими соли кальция, при отрицательных температурах наступает значительно раньше, чем с добавками солей щелочных металлов, и составы с хлоридом кальция характеризуются самым коротким временем активации. В присутствии добавок, содержащих NaCl , KCl , NaNO_2 , период ускоренной гидратации смещается в область более низких температур, и в большей степени это отмечается для составов с добавками NaCl .

Исследования, выполненные на рядовых цементах, показали [7], что на ранних этапах твердения цементных материалов при отрицательных температурах (особенно в жестких условиях при температурах минус $20\text{--}22^\circ\text{C}$) степень участия противоморозных добавок в формировании ранней структуры цементного камня, обусловленная формированием алюминатного каркаса, даже при повышенных дозировках весьма незначительна, и процессы образования льда в большинстве случаев являются преобладающими. Установлено, что противоморозные добавки на основе хлорида кальция в целом способствуют быстрой потере подвижности растворов. Противоморозные смеси, содержащие хлорид натрия, по сравнению с другими являются более предпочтительными, поскольку они в большей степени, чем другие добавки, понижают температуру замерзания растворов, и, как показали рентгенофазовые исследования, составы продуктов гидратации алюминатных и силикатных минералов цемента с добавками хлористых солей в большей степени отличаются количественными, а не качественными показателями. Поэтому добавки на основе хлорида натрия принципиально не изменяют фазового состава гидратированного цементного камня.

Однако установлено [6], что механизм активирующего действия ускоряющих добавок на основе электролитов на раннее структурообразование цементных систем главным образом определяется их влиянием на образование и стабилизацию гидроалюминатов кальция на раннем этапе гидратации и изменением соотношения

между гидратами AFm-фаз и C_3AH_6 . С увеличением дозировок добавок стабилизирующее влияние электролитов возрастает.

В отношении характера влияния СП и ГП на процесс гидратации цемента следует отметить, что в присутствии практически всех СП и ГП происходят замедление гидратации силикатных фаз цемента и стабилизация гидроалюминатов кальция AFm-фаз [6–9].

Анализ химического состава многих комплексных противоморозных добавок показал, что они в большинстве случаев состоят из двух компонентов: пластифицирующего и противоморозного. Негативным фактором применения подобных добавок является ограничение дозировок при их использовании в составе бетона. Это объясняется тем, что при повышенных дозировках пластифицирующий компонент может значительно замедлить процессы гидратации и тем более при отрицательных температурах, а противоморозного компонента может оказаться недостаточно для обеспечения интенсивного твердения на морозе, поскольку известно, что при температурах твердения ниже минус 5–10°C дозировки противоморозных добавок резко возрастают и достигают 7–10 % от массы цемента [9, 10]. Выполненные исследования показали, что при дозировках противоморозных добавок в пределах 8–10 % от массы цемента они обеспечивают достаточный темп твердения бетона при температуре минус 15°C и способствуют достижению при твердении на морозе в период 28 суток 33–40 % прочности бетона нормального твердения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Кинетика твердения традиционного тяжелого бетона при отрицательной температуре

Состав	Количество добавки, % от массы цемента	Температура твердения, °C	Прочность при сжатии, МПа, в % от прочности R_{28} нормального твердения (сут)			
			7	14	28	90
ЦЕМ II/A 32,5Н Состав бетона 1:2,2:3:4,3:0,6 Расход цемента 300 кг/м ³ $R_{28}=22,0$ МПа Без добавок		18	65	83	102	115
С добавкой $NaNO_2$	10	-15	10	21	32	52
С добавкой $Ca(NO_3)_2$	10	-15	12	30	37	55
С добавкой $CaCl_2$	8	-15	15	31	39	60
С добавкой NaCl	8	-15	13	25	32	50
С добавкой $CaCl_2 + NaCl$	5+3	-15	16	27	39	60
С добавкой ацетата кальция	8	-15	11	20	30	43
С добавкой ацетата натрия	8	-15	10	30	27	40

Одним из условий повышения эффективности зимнего бетонирования является использование комплексных противоморозных добавок на основе супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП) и тонкомолотых минеральных микронаполнителей. Важнейшим фактором для зимнего бетона является снижение водопотребности бетонных смесей, и это достигается применением СП и ГП различных составов. Вместе с тем, как отмечается в работах Калашникова В.И. и др. [11–18], эффективность пластификаторов может значительно возрасти при их использовании в составе бетона совместно с тонкомолотыми микронаполнителями с целью создания реологически активной тонкодисперсной цементно-минеральной матрицы. С одной стороны, это является положительным фактором при бетонировании в условиях отрицательных температур. С другой стороны, затравками кристаллизации воды могут являться всегда присут-

ствующие в ней незначительные твердые примеси, которые дополнительно уменьшают межфазное поверхностное натяжение и работу кристаллизации $A_{кр}$. Возможно, что одной из причин более быстрого льдообразования в цементно-песчаных растворах с добавками микрокремнезема и электролитов ($CaCl_2$ и $NaCl$), в отличие от составов с добавками только электролитов, являются именно частицы микрокремнезема, не вступившие в реакцию с $Ca(OH)_2$ и способствующие кристаллизации льда.

По нашему мнению, основным фактором, влияющим на эффективность зимнего бетонирования, является внедрение в производство технологических основ многофункциональных бетонов нового поколения. Основными целями подобных технологий являются:

1. Повышение реотехнологических свойств бетонных смесей, что позволит в значительной степени сократить затраты электроэнергии на уплотнение уложенного бетона.
2. Сокращение сроков твердения бетона до 1-3 суток до достижения требуемой критической прочности, что будет способствовать снижению затрат электроэнергии или пара для прогрева железобетонных конструкций (греющий провод, паровые рубашки, тепляки, метод термоса, инфракрасный прогрев и т.д.).
3. Сокращение сроков оборачиваемости опалубки.
4. Повышение эффективности «теплого» бетона, что позволит проектировать составы с минимальными дозировками добавок для «холодного» бетона.
5. Возможность повышения комплекса физико-механических свойств бетона и долговечности бетонных и железобетонных конструкций.
6. Снижение негативного влияния отрицательных температур на формирование ранней структуры бетона, которое может возникнуть при значительном (более 3 суток) времени набора бетоном критической прочности.
7. Сокращение продолжительности технологических циклов бетонирования.

В данной работе показана возможность получения многофункциональных бетонов нового поколения с высокими значениями ранней прочности.

Т а б л и ц а 2

Кинетика твердения и прочность реакционно-порошкового бетона

Состав	Расход на 1 м ³	В/Ц	Плотность ρ кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа, через (сут)		
				3	7	28
ЦЕМ I/A 42,5Н Melflux1641F 0,8 % от ЦЕМ	630	0,36	2189	73	104	126
Песок молотый $S_{уд}=3000$ см ² /г	300					
Микроволластонит 10 % от ЦЕМ	63					
Песок немолотый Фр. 0,16-0,63	915					
Микрокремнезем 12 % от ЦЕМ	74					
Вода	228					

Показано, что уже через 3 суток твердения возможно достижение прочности при сжатии 70 МПа и более, что в условиях зимнего бетонирования позволяет достигать значительных экономических эффектов. В ряде случаев целесообразным становится отказаться от добавок для «холодного» бетона.

Особое внимание при проектировании составов с комплексными противоморозными добавками следует уделять оценке влияния модификаторов на формирование начальной структуры, состав продуктов гидратации, раннюю прочность и кинетику твердения цементных систем. Исследования влияния противоморозных добавок на

кинетику изменения пластической прочности (P_T) показали, что при повышенных дозировках (до 10 % от Ц) они способствуют сохранению смесей в пластичном состоянии в период от 3 до 8 часов. В большей степени это характерно для добавки NaCl (рис. 1). Для комплексных добавок на основе СП и электролитов с увеличением дозировок последних отмечается снижение интенсивности роста P_T (рис. 2).

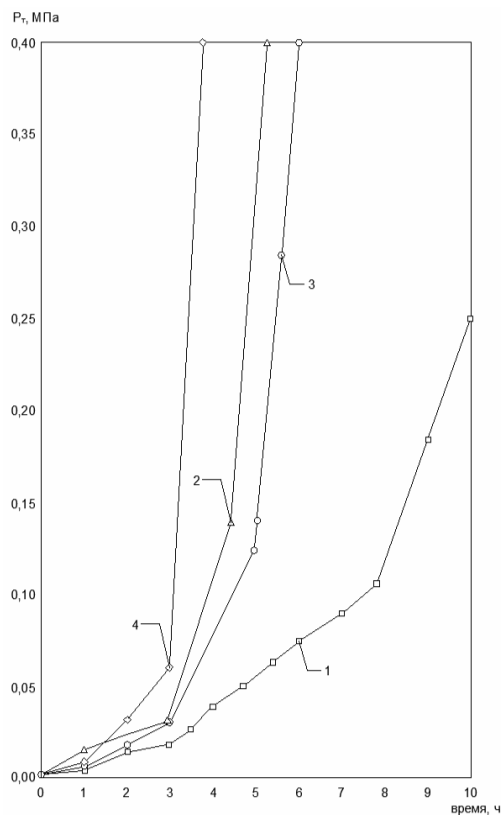


Рис. 1. Изменение пластической прочности цементно-песчаного раствора 1:2, В/Ц = 0,53, твердеющего при $t = -15^\circ\text{C}$. ЦЕМ/А 32,5Н: 1 – с добавкой NaCl (10%); 2 – с добавкой KCl (10%); 3 – с добавкой NaNO_2 (10%); 4 – с добавкой CaCl_2 (10%)

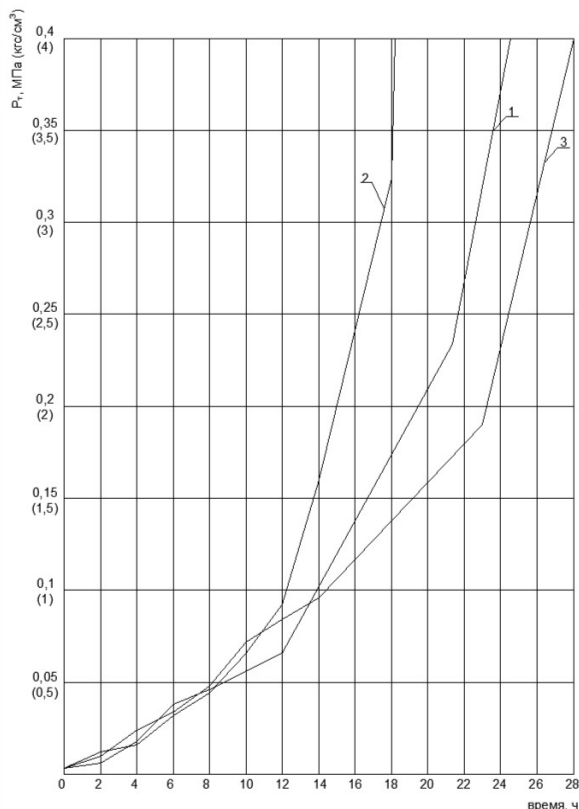


Рис. 2. Кинетика изменения пластической прочности цементно-песчаного раствора нормального твердения. Ц:П=1:2; В/Ц=0,5; ЦЕМ32,5Н: 1 – с добавкой СП (С-3) 0,8%; 2 – с добавкой СП (С-3) 0,8% + NaNO_2 2%; 3 – с добавкой СП (С-3) 0,8% + NaNO_2 6%

Комплексные добавки являются перспективными, поскольку они в большинстве случаев обладают полифункциональностью действия и в ряде случаев способствуют достижению синергетических эффектов. Кроме того, при использовании комплексных модификаторов создается возможность снижения или устранения негативного влияния какого-либо компонента, а также снижения влияния изменчивости химико-минералогического состава цемента и др. С другой стороны, комплексные добавки, состоящие из множества различных химических веществ, оказывают различное влияние на формирование гидратных фаз цементного камня. Например, практически все добавки нарушают порядок формирования гидратов и искажают их кристаллизационную структуру. Однако если в присутствии противоморозных компонентов, например электролитов, при гидратации цемента возможно образование двойных и тройных солей гидратов (гидрохлоралюминатов кальция, гидронитриалюминатов кальция и др.), то с добавками СП и ГП силикатные и алюминатные минералы цемента не образуют комплексных соединений, вследствие чего пластификаторы находятся в структуре цементного камня в качестве инородного компонента и с точки зрения формирования микроструктуры оказывают негативное влияние на цементный камень.

В процессе гидратации двойные и основные соли представлены в основном игольчатыми и хорошо оформленными кристаллами. Скорость их образования из

пересыщенных растворов выше, чем скорость образования гидросиликатов кальция; поэтому комплексные соли формируют первичный структурный каркас цементной системы и выполняют микроармирующую функцию в слабозакристаллизованной гидросиликатной массе.

С точки зрения влияния компонентов добавок на состав продуктов гидратации минералов цемента следует отметить, что силикатные и алюминатные фазы цемента различным образом реагируют на состав жидкой фазы.

Механизм активирующего действия ускоряющих добавок на раннее структурообразование цементных систем определяется главным образом влиянием электролитов на образование и стабилизацию гидроалюминатов кальция на раннем этапе гидратации и изменением соотношения между кристаллами АFm-фазы и C_3AH_6 . С увеличением дозировок добавок стабилизирующее влияние электролитов возрастает. Не отрицая возможности образования алюминатного каркаса из двойных солей-гидратов при повышенных дозировках добавок, приходим к выводу, что этот механизм, очевидно, не является определяющим фактором формирования начальной структуры цементных композиций [6, 7].

Одной из причин существенного различия скоростей образования гидроалюминатов кальция и двойных солей-гидратов в присутствии добавок является специфика поведения как катионов, так и анионов в водных растворах, обусловленная их различным электронным строением и размерами и, как следствие, различным влиянием на поляризацию воды и изменение ее свойств, в том числе и в структуре гидратов.

В присутствии инородных ионов в жидкой фазе цементных систем может изменяться нормальный порядок формирования кремнекислородных мотивов гидросиликатов кальция (ГСК), в результате чего в системе создается возможность активации образования ГСК различной структуры и свойств. Формирование подобной мелкокристаллитной структуры ГСК, возможно, является причиной повышения прочности цементного камня.

Анализ электронного строения катионов исследуемых добавок позволяет сделать предположение, что в цементных системах, особенно при повышенных дозировках добавок, характер химического поведения катионов и анионов в растворе становится одним из определяющих факторов, влияющих на скорость образования гидратных фаз, поскольку в присутствии гидратированных ионов изменяется не только вязкость воды, окружающей ионы, но и структура аквакомплексов, что, очевидно, отражается на характере изменения их поляризующего влияния на деформацию и разрыв связей в структуре безводных минералов при гидратации цемента [7].

Еще более сложным является механизм гидратации цементных минералов в присутствии комплексных добавок при отрицательных температурах, поскольку, кроме участия ионов добавок в формировании гидратных фаз, добавки и их компоненты различным образом влияют на изменение температуры замерзания воды и на ее структуру. Несмотря на то что состав продуктов гидратации цемента при положительных и отрицательных температурах практически не изменяется, тем не менее может изменяться соотношение гидратных фаз, например соотношение метастабильных гидроалюминатов кальция.

В связи с этим основными факторами в технологии зимнего бетонирования при анализе процессов гидратации цементных материалов в присутствии комплексных добавок являются следующие:

1. Характер влияния добавок на формирование ранней структуры цементного камня и бетона (особенно влияние повышенных добавок электролитов для «холодного» бетона).
2. Характер изменения температурных условий твердения (быстрое или медленное охлаждение и замораживание).

При использовании добавок электролитов или их смесей при повышенных дозировках (7 % и более от массы цемента) формирование ранней кристаллизационной структуры бетона ускоряется, и раннее быстрое замораживание может оказать негативное влияние на частично сформированный кристаллизационный каркас, а

следовательно, и на структуру бетона в последующем. В этом случае следует отказаться от использования подобных комплексов, но опять-таки с учетом температурных условий твердения. Например, при низких положительных и небольших отрицательных температурах применение подобных добавок будет эффективным. При резком замораживании и низких отрицательных температурах ускоряющее влияние добавок может оказать отрицательное воздействие на микроструктуру бетона.

К использованию в технологии бетонов органоминеральных добавок также следует относиться с осторожностью, поскольку частицы микронаполнителя могут способствовать образованию микрокристаллов льда в структуре бетона. Кроме того, пластифицирующие компоненты способствуют замедлению гидратации силикатных фаз цемента.

Были выполнены рентгенофазовые исследования образцов цементного камня без добавок, с добавкой тонкодисперсного кальцита и с добавкой кальцита совместно с суперпластификатором.

Установлено, что, по данным РФА, малое количество кальцита (2 % от массы цемента) по параметрам интенсивности отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и безводных силикатных фаз цемента (C_3S и $\beta\text{-C}_2\text{S}$) практически не приводит к активации гидратации. Интенсивности отражений извести в составах N1, N2 и N3 примерно равны, однако несколько ниже в составе с добавкой смеси кальцита и СП. Это свидетельствует о некотором замедлении гидратации цемента в присутствии органоминеральной добавки. На рентгенограммах контрольного образца (N1), с добавкой CaCO_3 (N2) и комплексной смеси CaCO_3 +СП (N3) интенсивности отражений гидрокарбоалюминатов кальция (2,8 и 2,51 Å) практически равны. Очевидно, что такого количества кальцита недостаточно для образования гидрокарбоалюминатов кальция, а также скаутита, таумасита и гидрокальцитов. Анализ результатов изменения прочностных показателей контрольных составов и составов с известняком показал, что наиболее эффективна добавка известняка в количестве 1-5 % от массы цемента при твердении в условиях ТВО. При твердении в нормальных условиях эффективность добавки несколько ниже. Более эффективной добавкой является комплексная смесь, состоящая из кальцита и диопсида, способствующая повышению прочности цементных материалов на 40-45 %. Возможно, что упрочнение цементного камня в присутствии малого количества кальцита или бинарных добавок происходит за счет образования микрокристаллов гидратных фаз по механизму эпитаксиального наращивания, что в целом приводит к повышению прочности цементно-минеральной системы. Наиболее эффективным способом повышения прочности бетона, в том числе и при зимнем бетонировании, является использование тонкомолотого кальцита в количестве 80-100 % от массы цемента с целью увеличения количества цементно-минеральной матрицы, ответственной за реотехнологические свойства бетона и повышение эффективности СП и ГП с целью снижения водосодержания бетонных смесей.

Таким образом, к решению проблемы повышения эффективности зимнего бетонирования следует подходить комплексно с позиций анализа механизмов действия добавок и их влияния на фазовый состав продуктов гидратации, микроструктуру, кинетику твердения, прочность и долговечность бетона.

Список литературы

1. Meng, W. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC / W. Meng, K.H. Khayat // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 105. – P. 64–71.
2. Wu, B. Compressive fatigue behavior of compound concrete containing demol-ished concrete lumps / B. Wu, H. Jin // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 210. – P. 140–56.
3. Cassagnabère, F. Study of the reactivity of cement/me-takaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete / F. Cassagnabère, G. Escadeillas, M. Mouret // *Construction and Building Materials*. – 2009. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.022.

4. Максимова, И.Н. Структура и конструкционная прочность цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – М.: АСВ, 2017. – 400 с.
5. Башлыков, В.Н. Специальные цементы для производства бетонных работ в зимнее время / В.Н. Башлыков, П.Н. Сиротин // Строительные материалы. – 2010. – № 2. – С. 49–52.
6. Тараканов, О.В. Бетоны с модифицирующими добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2004. – 564с.
7. Тараканов, О.В. Цементные материалы с ускоряющими и противоморозными добавками на основе вторичного сырья / О.В. Тараканов. – Пенза: ПГУАС, 2003. – 422 с.
8. Tarakanov O., Belyakova E., Kalashnikov V., Grintsova O., Makridin N. (2016). The Influence of Plasticizer on the Composition of Cement Stone Hydration Products. 10.2991/ismems-16.2016.33.
9. Тараканов, О.В. Влияние органоминеральных добавок на формирование микроструктуры и кинетику твердения бетона при отрицательных температурах / О.В. Тараканов, Ю.Г. Иващенко, И.В. Ерофеева // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3(56). – С. 91–102.
10. Тараканов, О.В. Повышение эффективности действия противоморозных добавок в технологии бетона / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, И.В. Ерофеева, Е.А. Белякова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 4(89). – С. 114–129.
11. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – №1–2. – С. 62–67.
12. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70.
13. Калашников, В.И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – №12 (988). – С. 48–52.
14. Хозин, В.Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности – «зеленая» альтернатива цементной индустрии России / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, И.Р. Сибгатуллин [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – №5. – С. 76–82.
15. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // Proc. 14, Jbausil, 2000, Bd. 1, P. 1083–1091.
16. Тараканов, О.В. Расширение базы комплексных органоминеральных добавок в технологии бетона / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – Вып. 3(88). – С. 97–107.
17. Тараканов, О.В. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве / О.В. Тараканов, Т.К. Акчурин, Е.А. Белякова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1 (86). – С. 163–174.
18. Калашников, В.И. Бетоны переходного и нового поколений: состояние и перспективы / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, В.М. Володин, И.В. Ерофеева, Д.А. Абрамов // Технологии бетонов. Сер. Сухие строительные смеси. – 2023. – №2. – С. 33–38.

References

1. Meng, W. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC / W. Meng, K.H. Khayat // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 105. – P. 64–71.
2. Wu, B. Compressive fatigue behavior of compound concrete containing demol-ished concrete lumps / B. Wu, H. Jin // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 210. – P. 140–56.

3. Cassagnabère, F. Study of the reactivity of cement/me-takaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete / F. Cassagnabère, G. Escadeillas, M. Mouret // *Construction and Building Materials*. – 2009. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.022.
4. Maksimova, I.N. Structure and structural strength of cement composites / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev, Yu.P. Skachkov. – M.: DIA, 2017. – 400 p.
5. Bashlykov, V.N. Special cements for the production of concrete works in winter / V.N. Bashlykov, P.N. Sirotin // *Building materials*. – 2010. – No. 2. – P. 49–52.
6. Tarakanov, O.V. Concretes with modifying additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2004. – 564 p.
7. Tarakanov, O.V. Cement materials with accelerating and antifreeze additives based on secondary raw materials / O.V. Tarakanov. – Penza: PGUAS, 2003. – 422 p.
8. Tarakanov O., Belyakova E., Kalashnikov V., Grintsova O., Makridin N. (2016). The Influence of Plasticizer on the Composition of Cement Stone Hydration Products. 10.2991/ismems-16.2016.33.
9. Tarakanov, O.V. Influence of organomineral additives on the formation of microstructure and kinetics of concrete hardening at negative temperatures / O.V. Tarakanov, Yu.G. Ivashchenko, I.V. Erofeeva // *Regional architecture and engineering*. – 2023. – No. 3(56). – P. 91–102.
10. Tarakanov, O.V. Improving the effectiveness of antifreeze additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, I.V. Yerofeeva, E.A. Belyakova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. – 2022. – Issue 4(89). – P. 114–129.
11. Kalashnikov, V.I. On the use of complex additives in new generation concretes / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov // *Building materials*. – 2017. – No.1-2. – P. 62–67.
12. Kalashnikov, V.I. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, O.V. Tarakanov, D.V. Kalashnikov, O.V. Suzdaltsev // *Building materials*. – 2014. – No.9. – P.70.
13. Kalashnikov, V.I. The concept of strategic development of plasticized powder-activated concretes of a new generation / V.I. Kalashnikov // *BST: Bulletin of construction machinery*. – 2016. – №12 (988). – P. 48–52.
14. Khozin, V.G. Carbonate cements of low water demand are a «green» alternative to the cement industry in Russia / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, I.R. Sibgatullin [et al.] // *Building materials*. – 2014. – No.5. – P. 76–82.
15. Schmidt, M. Möglichkeiten und Crensen von Hochfester Beton / M. Schmidt, R. Bornemann // *Proc. 14, Jbausil, 2000, Bd. 1, P. 1083–1091*.
16. Tarakanov, O.V. Expansion of the base of complex organomineral additives in concrete technology / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. – 2022. – Issue 3(88). – P. 97–107.
17. Tarakanov, O.V. Application of modified concretes of a new generation in construction / O.V. Tarakanov, T.K. Akchurin, E.A. Belyakova // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2022. – № 1 (86). – P. 163–174.
18. Kalashnikov, V.I. Concretes of transitional and new generations. status and prospects / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, V.M. Volodin, I.V. Yerofeeva, D.A. Abramov // *Concrete technologies. Series: Dry building mixes*. – 2023. – No. 2. – P. 33–38.

УДК 666.266.6:620.193.82

DOI 10.54734/20722958_2024_4_73

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

Россия, 430005, Саранск,
ул. Большевикская, д. 68
тел.: (8342)47-71-56; факс: (8342)47-71-56

Ермаков Анатолий Анатольевич,
аспирант кафедры «Строительные
материалы и технологии»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Родин Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные материалы
и технологии»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

*Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)*
Россия, 603022, г. Нижний Новгород,
пр. Гагарина, д. 23,
тел.: (831) 462-30-90

Захарова Елена Александровна,
научный сотрудник лаборатории
микробиологического анализа отдела
химико-биологических исследований
научно-исследовательского института
химии
E-mail: zaharova64ea@mail.ru

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

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

Ermakov Anatoly Anatolyevich,
Postgraduate student of the Department
«Building materials and technologies»
E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Rodin Aleksander Ivanovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building materials
and technologies»
E-mail: AL_Rodin@mail.ru

*National Research Lobachevsky State
University of Nizhny Novgorod (UNN)*
Russia, 603022, Nizhny Novgorod, 23,
Gagarin Ave,
tel.: (831) 462-30-90

Zakharova Elena Aleksandrovna,
Researcher at the laboratory of
microbiological analysis of the department
of chemical and biological research of the
scientific research institute of chemistry
E-mail: zaharova64ea@mail.ru

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 21-79-10422).

СТОЙКОСТЬ ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ

А.А. Ермаков, Е.А. Захарова, А.И. Родин

Установлены влияние фазового состава пористой стеклокерамики (ПСК) на грибостойкие и фунгицидные свойства образцов, а также видовой состав микромицетов на их поверхности. Все исследованные образцы ПСК обладают грибостойкими свойствами. Доминирующим видом микромицетов на поверхности всех образцов ПСК после 14 суток испытания в стандартной среде мицелиальных грибов по ГОСТ 9.049–91 (метод 3) является *Penicillium cyclosporum*. По показателю стойкости к воздействию плесневых грибов ПСК из цеолитсодержащих пород не уступает наиболее распространенным строительным материалам, таким, как цементный бетон, керамический кирпич и др.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, грибостойкость, плесневые грибы, видовой состав, цеолитсодержащие породы

RESISTANCE OF POROUS GLASS CERAMICS FROM ZEOLITE- CONTAINING ROCKS TO THE IMPACT OF MOLD FUNGI

A.A. Ermakov, E.A. Zakharova, A.I. Rodin

The influence of the phase composition of porous glass ceramics (PGC) on the fungal and fungicidal properties of samples, as well as the species composition of micromycetes on their surface, has been established. All the studied PGC samples have mushroom-resistant properties. The dominant

type of micromycetes on the surface of all PGC samples after 14 days of testing in a standard environment of mycelial fungi according to GOST 9.049–91 (method 3) is *Penicillium cyclopium*. In terms of resistance to mold fungi, PGC made of zeolite-containing rocks is not inferior to the most common building materials such as cement concrete, ceramic bricks, etc.

Keywords: porous glass ceramics, fungal resistance, mold fungi, species composition, zeolite-containing rocks

Введение. На современном строительном рынке большим спросом пользуются материалы, которые обладают сразу комплексом уникальных свойств. Одним из таких материалов является пористая стеклокерамика. Изделия и конструкции из нее легкие, прочные, негорючие. Их используют также в качестве звуко- и теплоизоляционных материалов [1–3]. Получают такие материалы из кремнистых, карбонатных, глинистых и других горных пород [4, 5], а также из металлургических шлаков, зол [6], отходов стекольного производства [2] и др. Способы их получения также разнообразны: порошковое вспенивание [1], вспенивание суспензии [7] и др. Первый способ, как правило, состоит из двух стадий. На первом этапе варится стекло, которое затем размалывается с газообразующими добавками и повторно нагревается до температуры более +500 °С [1]. Методом вспенивания суспензии производят в основном пористые стеклокерамические материалы из кремнистых пород [7]. Данный метод одностадийный, однако распространён только для получения гранулированных материалов. В предыдущих работах нами представлены технологические особенности разработки ПСК порошковым методом за одну стадию нагрева шихты, который заключается в сухом помоле цеолитсодержащих пород (влажность $\leq 3\%$), кальцинированной соды и добавок с последующим обжигом в металлических формах [8, 9]. В результате получен экологичный, легкий, химически стойкий материал в форме блока, который более чем в 2 раза прочнее газо- и пенобетона при равной плотности. Температура применения таких материалов достигает +900 °С. Материалы и изделия из ПСК рекомендованы к использованию в качестве несущих и самонесущих конструкций стен в зданиях, в качестве звукоизоляции, теплоизоляции, в том числе котельного оборудования, труб и т.п.

Во время эксплуатации зданий и сооружений строительные материалы, из которых они изготовлены, подвергаются различным коррозионным воздействиям (переменные температуры, химические агрессивные среды и др.). Особым видом коррозионного воздействия является биологически агрессивная среда. Материалы корродируют от действия бактерий, плесневых грибов, растений и животных. Механизмы коррозионного воздействия на материал различных организмов разнообразны. Животные, как правило, разрушают материал в результате прямого механического воздействия, растения – при расширении вследствие впитывания влаги и т.п. [10]. Наиболее негативное комплексное разрушающее воздействие (химическое, физико-химическое, электрохимическое и др.) на материал оказывают бактерии и плесневые грибы [10]. Длительное воздействие биологически агрессивных сред, а также низкая биологическая стойкость строительных материалов приводят к снижению эксплуатационной надежности зданий и сооружений, ухудшению экологической ситуации в них, дополнительным финансовым затратам и т.п.

Химический и минералогический состав материала оказывает прямое воздействие на его обрастаемость плесневыми грибами, а также биологическую стойкость [10, 11]. Согласно литературным источникам, обрастаемость плесневыми грибами окислов без дополнительных источников питательной среды уменьшается с увеличением атомной массы элементов в пределах до IV группы периодической системы [10, 12]. Наибольшей стойкостью к обрастанию плесневыми грибами обладают минералы с повышенным количеством элементов I и II групп периодической системы в составе: слюды, глинистые минералы, карбонаты и т.п. [13]. Из цеолитсодержащих пород разработана анортотлазовая, диопсидовая, волластонитовая и волластонито-комбеитовая ПСК. Результаты изучения стойкости таких материалов к воздействию плесневых грибов в литературе отсутствуют. На основании вышеизложенного была сформулирована цель

данного исследования: установить влияние фазового состава пористой стеклокерамики на грибостойкие и фунгицидные свойства образцов, а также видовой состав микромицетов на их поверхности.

Задачи:

- определить фазовый состав образцов ПСК;
- в соответствии с ГОСТ 9.049–91 методами 1 и 3 изучить стойкость исследуемых образцов к воздействию плесневых грибов;
- установить видовой состав микромицетов на поверхности образцов ПСК после экспонирования в стандартной среде мицелиальных грибов.

Материалы и методы исследования. В ходе эксперимента было исследовано 5 видов образцов пористой стеклокерамики различного химического и минералогического состава. Образцы получены по методикам, которые рассмотрены в наших предыдущих работах [8, 9]. На рис. 1 представлено фото поверхности образцов до испытания.

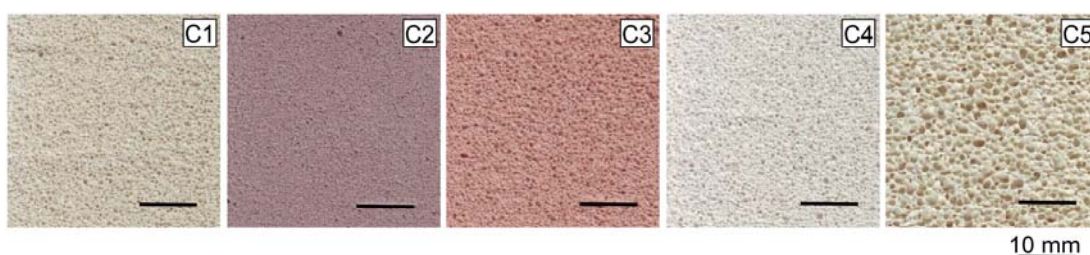


Рис. 1. Фото поверхности образцов

В табл. 1 приведены физико-механические и теплофизические характеристики исследуемых образцов ПСК.

Т а б л и ц а 1

Характеристики образцов ПСК

№ состава	Характеристики по ГОСТ 31359–2007			Характеристики по ГОСТ 5040-2015
	Марка по средней плотности	Класс по прочности на сжатие	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С)	Рекомендованная максимальная температура применения, °С
C1	D300	B3,5	0,088	+850
C2	D350	B7,5	0,099	+850
C3	D250	B3,5	0,066	+850
C4	D200	B1,5	0,057	+850
C5	D200	B0,75	0,055	+850

Исследуемые в работе образцы ПСК по физико-механическим и теплофизическим характеристикам (см. табл. 1) могут быть использованы в качестве несущих и самонесущих конструкций стен в малоэтажном строительстве, а также в качестве теплоизоляционных материалов. Благодаря высокой температуре применения (до +850 °С) их можно использовать в качестве высокотемпературной теплоизоляции. Для определения стойкости образцов ПСК из цеолитсодержащих пород к воздействию плесневых грибов они были испытаны по следующим методикам.

Качественный фазовый состав образцов ПСК установлен методом РФА. Образцы ПСК измельчали с помощью агатовой ступки с пестиком до полного прохождения через сито 008. Рентгеновские дифрактограммы порошков и их расшифровка получены по методикам, которые представлены в наших ранних работах [8, 9].

Грибостойкость пористой стеклокерамики, а также наличие у нее фунгицидных свойств установлены на образцах размером 10×10×30 мм в соответствии с ГОСТ 9.049–91 методами 1 и 3.

Видовой состав доминирующих микроорганизмов на поверхности образцов определен после 14 суток выдерживания в чашке Петри по ГОСТ 9.049–91 (метод 3).

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов ПСК.

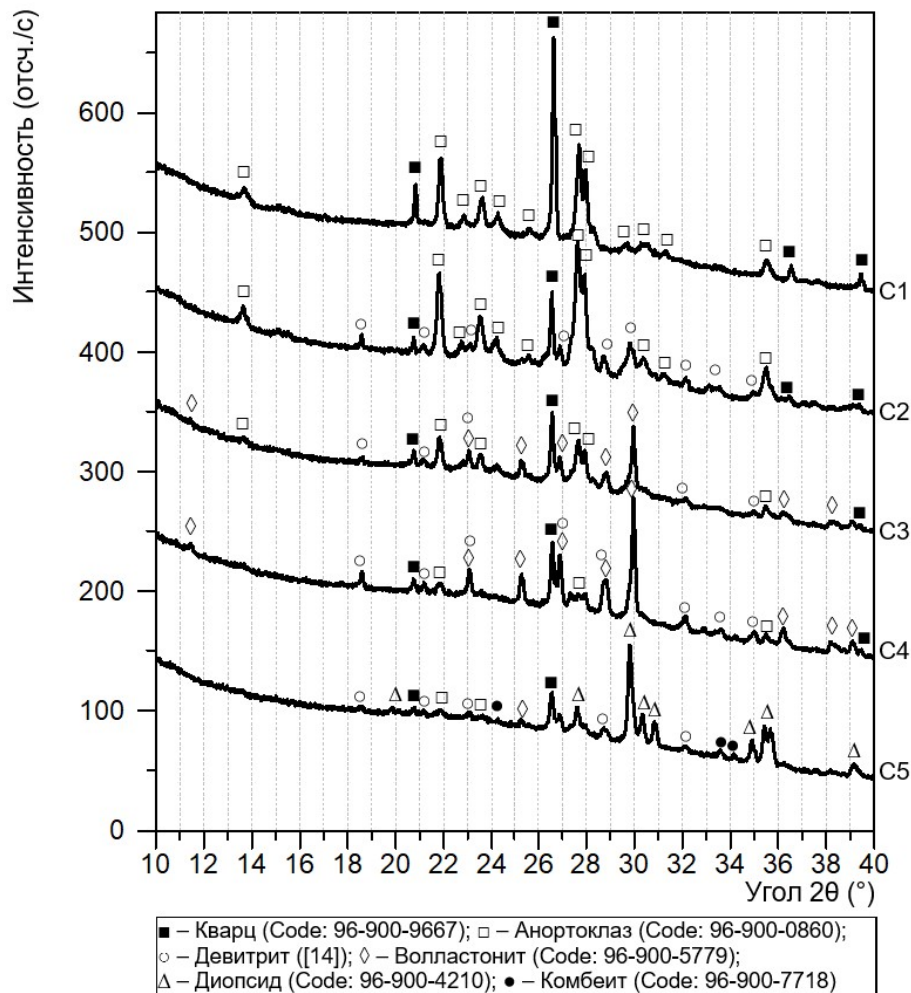


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов ПСК

По результатам РФА образцов (см. рис. 2) установлен качественный фазовый состав материалов. Все исследуемые образцы ПСК состоят из аморфной и кристаллической фаз. О наличии в составе материала аморфной фазы свидетельствует широкое рентгеноаморфное гало на дифрактограммах всех образцов между 15° и 35° (2θ). Для определения влияния фазового состава ПСК на грибостойкие и фунгицидные свойства образцов, а также видового состава микромицетов на их поверхности были подобраны образцы, кристаллические фазы которых значительно различаются по своему составу. В образце C1 она представлена в основном анортотлазом состава $(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ и кварцем (SiO_2). Состав кристаллической фазы образца C2 от C1 отличается меньшим количеством кварца, о чем свидетельствует снижение интенсивности соответствующих линий на дифрактограммах, а также присутствием дополнительно минерала девитрита ($\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$) [14]. На дифрактограммах образцов C3 и C4 кроме кварца, анортотлаза и девитрита идентифицированы пики, соответствующие минералу волластониту (CaSiO_3). Анализ интенсивности соответствующих линий на дифрактограммах показал, что у образца C4 в сравнении с C3 количество волластонита и девитрита больше, а анортотлаза значительно меньше. Образец C5 можно отнести к диопсидовой стеклокерамике, так как основной кристаллической фазой является диопсид ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) с небольшим количеством кварца, девитрита и комбеита ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$).

Влияние фазового состава образцов ПСК на их обрастаемость плесневыми грибами наглядно представлено на рис. 3. На фото приведены образцы после испытания по методам 1 и 3 (ГОСТ 9.049–91).

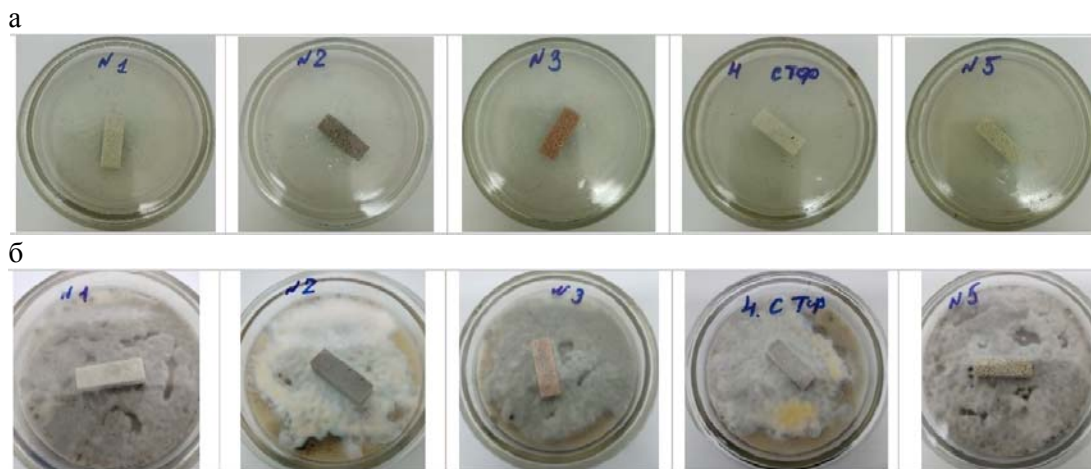


Рис. 3. Фото образцов после испытания по методам 1 (а) и 3 (б)

На рис. 3 видно, что все испытанные образцы ПСК после 14 суток выдерживания в стандартной среде плесневых грибов по ГОСТ 9.049–91 (метод 3) заросли мицелием. Степень развития мицелия на поверхности образцов, а также их видовой состав представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Обрастаемость образцов ПСК и видовой состав микроорганизмов на их поверхности

№ состава	Степень развития плесневых грибов по ГОСТ 9.049–91, баллы		Характеристика по ГОСТ 9.049–91	Видовой состав доминирующих микроорганизмов после 14 сут выдерживания в чашке Петри (ГОСТ 9.049–91, метод 3)
	метод 1	метод 3		
1	0	3, 4	Грибостоек	Penicillium cyclopium , <i>Aspergillus niger</i> (очень мало)
2	0	5	Грибостоек	Penicillium cyclopium , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> (очень мало)
3	0	5	Грибостоек	Penicillium cyclopium , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Aspergillus niger</i> (очень мало)
4	0	5	Грибостоек	Penicillium cyclopium , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Aspergillus niger</i> (очень мало), <i>Penicillium funiculosum</i> (очень мало)
5	2	5	Грибостоек	Penicillium cyclopium , <i>Penicillium funiculosum</i>

Исследованные образцы ПСК проявили различную устойчивость к воздействию плесневых грибов (см. табл. 2). Все образцы грибостойки. ПСК составов С1–С4 не является питательной средой для плесневых грибов. В отсутствие внешних загрязнений (метод 1) образцы не поражались плесневыми грибами. Диопсидовая стеклокерамика (С5) содержит питательные вещества, которые обеспечивают незначительное развитие грибов. На образцах С5 под микроскопом видны ветвящиеся гифы и спороношение (2 балла). Фунгицидный эффект у пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород отсутствует. Степень развития микромицетов на поверхности всех

образцов ПСК в соответствии с ГОСТ 9.049–91 (метод 3) от 3 до 5 баллов. Данный результат свидетельствует о том, что при наличии питательной среды образцы ПСК независимо от фазового состава обладают почти оптимальными условиями для жизнедеятельности плесневых грибов.

Доминирующим видом микромицетов на поверхности всех образцов ПСК после 14 суток испытания в стандартной среде мицелиальных грибов (метод 3) является грибок рода *Penicillium* (*Penicillium cyclospium*). Кроме микромицетов *Penicillium cyclospium* на поверхности отдельных образцов были идентифицированы и другие виды рода *Penicillium* – *Penicillium chrysogenum* и *Penicillium funiculosum*, а также микромицеты рода *Aspergillus* – *Aspergillus niger*. Все микромицеты представлены отдельными небольшими колониями. Микромицеты вида *Aspergillus niger* идентифицированы на образцах как аноктоклазовой, так и волластонитовой стеклокерамики. *Penicillium chrysogenum* и *Penicillium funiculosum* – только на образцах ПСК с волластонитом и девитритом в составе. На образцах диопсидовой стеклокерамики кроме доминирующего вида *Penicillium cyclospium* идентифицировано небольшое количество микромицетов вида *Penicillium funiculosum*.

Все идентифицированные на образцах ПСК виды микромицетов являются аллергенами для человека и могут продуцировать микотоксины, вызывающие токсическую реакцию у людей и животных. Кроме того, отдельные виды, такие, как *Aspergillus niger*, потенциально онкогены [9, 11]. Сравнив полученные результаты с аналогичными показателями для цементных, керамических и других, массово применяемых строительных материалов, установили, что по показателю стойкости к воздействию плесневых грибов ПСК из цеолитсодержащих пород им не уступает.

Выводы. Установлено, что стойкость пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород к воздействию плесневых грибов можно увеличить регулированием фазового состава материала. В ходе эксперимента было исследовано 5 видов образцов пористой стеклокерамики: аноктоклазовая, волластонитовая, диопсидовая и др. Марки по средней плотности образцов – D200–D350, класс по прочности на сжатие – B0,75–B7,5, коэффициент теплопроводности – от 0,055 до 0,099 Вт/(м·°C), рекомендованная максимальная температура применения до +890 °C.

Все исследованные образцы ПСК обладают грибостойкими свойствами. В отсутствие внешних загрязнений только диопсидовая стеклокерамика содержит питательные вещества, которые обеспечивают незначительное развитие плесневых грибов. При наличии питательной среды независимо от фазового состава на поверхности образцов ПСК почти оптимальные условия для жизнедеятельности микромицетов.

Доминирующим видом микромицетов на поверхности всех образцов ПСК после 14 суток испытания в стандартной среде мицелиальных грибов по ГОСТ 9.049–91 (метод 3) является *Penicillium cyclospium*. В зависимости от фазового состава ПСК на их поверхности присутствуют отдельными небольшими колониями грибы видов *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium funiculosum* и *Aspergillus niger*, которые в разной степени токсичны для человека и животных.

По показателю стойкости к воздействию плесневых грибов ПСК из цеолитсодержащих пород не уступает наиболее распространенным строительным материалам, таким, как цементный бетон, керамический кирпич и др.

Список литературы

1. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen, M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. – 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.
2. Hisham, N.A.N. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various

temperatures / N.A.N. Hisham, M.H.M. Zaid, S.H.A. Aziz, F.D. Muhammad // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(3). – 570. – DOI: 10.3390/ma14030570.

3. Бессонов, И.В. Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения / И.В. Бессонов, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, Э.А. Горбунова // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2023. – Т. 15, № 5. – С. 424–437. – DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437.

4. Beregovoi, V.A. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin, A.M. Beregovoi // *Defect and Diffusion Forum*. – 2021. – Vol. 410. – P. 823–828. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823.

5. Ivanov, K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales / K.S. Ivanov // *Glass and Ceramics*. – 2022. – Vol. 79. – P. 234–238. – DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4.

6. Jia, R. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics / R. Jia, L. Deng, F. Yun, H. Li, X. Zhang, X. Jia // *Materials Chemistry and Physics*. – 2019. – Vol. 233. – P. 155–162. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.05.065.

7. Huo, W. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure / W. Huo, S. Yan, J.-M. Wu, J. Liu, Y. Chen, Y. Qu, X. Tang, J. Yang // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 5502–5511. – DOI: 10.1111/jace.15089.

8. Rodin, A.I. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, V.M. Kyashkin, N.G. Rodina, V.T. Erofeev // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 121(5). – 12109. – DOI: 10.34910/MCE.121.9.

9. Rodin, A.I. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, I.V. Erofeeva, V.T. Erofeev // *Materials Physics and Mechanics*. – 2023. – Vol. 51(5). – P. 127–141. – DOI: 10.18149/MPM.5152023_13.

10. Травуш, В.И. Биологическая стойкость цементных композитов / В.И. Травуш, Н.И. Карпенко, В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, В.Ф. Смирнов, Н.Г. Родина // *Гидротехническое строительство*. – 2017. – № 8. – С. 13–19.

11. Смирнов, В.Ф. Экологические аспекты биокоррозии и повышение биостойкости строительных материалов / В.Ф. Смирнов, Д.А. Светлов, М.М. Зоткина, Д.Д. Светлов, М.Е. Бажанова, М.В. Вильдяева, Е.А. Захарова // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2021. – № 4. – С. 14–26. – DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14.

12. Шишкин, А.Ю. Фунгицидная активность сложного оксида тяжелых металлов в условиях темноты и действия видимого света / А.Ю. Шишкин, В.Ф. Смирнов, О.Н. Смирнова, Н.А. Аникина, Д.Г. Фукина, А.В. Корягин, Е.В. Сулейманов // *Успехи медицинской микологии*. – 2022. – Т. 23. – С. 237–239.

13. Sanjurjo-Sánchez, J. Biomineral deposits and coatings on stone monuments as biodeterioration fingerprints / J. Sanjurjo-Sánchez, C. Alves, M. Freire-Lista David // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 912. – 168846. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168846.

14. Kahlenberg, V. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses / V. Kahlenberg, D. Girtler, E. Arroyabe, R. Kaindl, D.M. Többs // *Mineralogy and Petrology*. – 2010. – Vol. 100. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8.

References

1. König, J. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman, M.A. Rodriguez-Perez, R.R. Petersen, M.B. Østergaard, N. Iversen, Y. Yue, M. Spreitzer // *Construction and*

Building Materials. – 2020. – Vol. 247. – 118574. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574.

2. Hisham, N.A.N. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures / N.A.N. Hisham, M.H.M. Zaid, S.H.A. Aziz, F.D. Muhammad // Materials. – 2021. – Vol. 14(3). – 570. – DOI: 10.3390/ma14030570.

3. Bessonov, I.V. Investigation of the operational qualities of foamed materials based on cold-cured liquid glass / I.V. Bessonov, B.I. Bulgakov, O.V. Alexandrova, E.A. Gorbunova // Nanotechnology in construction. – 2023. – Vol. 15, No. 5. – P. 424–437. – DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437.

4. Beregovoi, V.A. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology / V.A. Beregovoi, D.S. Sorokin, A.M. Beregovoi // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 823–828. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823.

5. Ivanov, K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales / K.S. Ivanov // Glass and Ceramics. – 2022. – Vol. 79. – P. 234–238. – DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4.

6. Jia, R. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics / R. Jia, L. Deng, F. Yun, H. Li, X. Zhang, X. Jia // Materials Chemistry and Physics. – 2019. – Vol. 233. – P. 155–162. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.05.065.

7. Huo, W. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure / W. Huo, S. Yan, J.-M. Wu, J. Liu, Y. Chen, Y. Qu, X. Tang, J. Yang // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 5502–5511. – DOI: 10.1111/jace.15089.

8. Rodin, A.I. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, V.M. Kyashkin, N.G. Rodina, V.T. Erofeev // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 121(5). – 12109. – DOI: 10.34910/MCE.121.9.

9. Rodin, A.I. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ / A.I. Rodin, A.A. Ermakov, I.V. Erofeeva, V.T. Erofeev // Materials Physics and Mechanics. – 2023. – Vol. 51(5). – P. 127–141. – DOI: 10.18149/MPM.5152023_13.

10. Travush, V.I. Biological resistance of cement composites / V.I. Travush, N.I. Karpenko, V.T. Erofeev, A.I. Rodin, V.F. Smirnov, N.G. Rodina // Hydrotechnical construction. – 2017. – No. 8. – P. 13–19.

11. Smirnov, V.F. Ecological aspects of biocorrosion and increasing the biostability of building materials / V.F. Smirnov, D.A. Svetlov, M.M. Zotkina, D.D. Svetlov, M.E. Bazhanova, M.V. Vildyaeva, E.A. Zakharova // Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2021. – No. 4. – P. 14–26. – DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14.

12. Shishkin, A.Yu. Fungicidal activity of complex heavy metal oxide in conditions of darkness and visible light / A.Yu. Shishkin, V.F. Smirnov, O.N. Smirnova, N.A. Anikina, D.G. Fukina, A.V. Koryagin, E.V. Suleymanov // Successes of medical mycology. – 2022. – Vol. 23. – P. 237–239.

13. Sanjurjo-Sánchez, J. Biomineral deposits and coatings on stone monuments as biodeterioration fingerprints / J. Sanjurjo-Sánchez, C. Alves, M. Freire-Lista David // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 912. – 168846. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168846.

14. Kahlenberg, V. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses / V. Kahlenberg, D. Girtler, E. Arroyabe, R. Kaindl, D.M. Többers // Mineralogy and Petrology. – 2010. – Vol. 100. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8.

УДК 691.5

DOI 10.54734/20722958_2024_4_81

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

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

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

Пылаев Вадим Сергеевич,
аспирант кафедры «Управление качеством
и технология строительного производства»
E-mail: mazhitov201090@gmail.com

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

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

Pylaev Vadim Sergeevich,
Postgraduate of the Department «Quality
management and Construction Technologies»
E-mail: whenpay@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИСАХАРИДОВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

В.И. Логанина, В.С. Пылаев

Приведены сведения о влиянии синтетических полисахаридов на структурообразование известковых покрытий. Показано, что вследствие водоудерживающего действия добавки создаются более благоприятные условия для карбонизации извести. Методами рентгенофазового термографического анализа и оптической инфракрасной спектроскопии установлено наличие как меж-, так и внутрикristаллических органических соединений, которые модифицируют структуру новообразованных кристаллов кальцита и повышают прочность известковых покрытий.

Ключевые слова: известь, полисахариды, структурообразование, когезионная прочность

THE INFLUENCE OF SYNTHETIC POLYSACCHARIDES ADDITIVES ON STRUCTURE FORMATION OF LIME COMPOSITES

V.I. Loganina, V.S. Pylaev

Some information on the influence of synthetic polysaccharides on the structure formation of lime coatings is provided. It has been shown that due to the water-retaining effect of the additive, more favorable conditions are created for lime carbonation. Using X-ray phase and thermographic analysis, optical and infrared spectroscopy, the presence of inter- and intracrystalline organic compounds has been established, which modify the (nano)structure of newly formed calcite crystals and increase the strength of lime coatings.

Key words: lime, polysaccharides, structure formation, cohesive strength

Для реставрации объектов культурного наследия широкое применение находят составы на основе известкового вяжущего [1]. Учитывая низкую стойкость покрытий на основе известкового вяжущего в рецептуру вводят различные модифицирующие добавки [2–7].

В ряде исследований в составе штукатурных оснований древней живописи отмечались различные органические добавки на основе кровяного альбумина, казеина, природных смол, белков куриного яйца, отваров зерен злаков, растительных масел [8–10]. Роль органических добавок долгое время оставалась неясной, что было связано со сложностью определения их в гипсовых и известковых вяжущих существующими аналитическими методами. Практически до настоящего времени органические клеи

рассматривались в качестве пластифицирующей и замедляющей схватывание вяжущих материалов добавки. Было изучено лишь влияние добавок клея на время схватывания гипсовых вяжущих.

Древними каменщиками племени майя при изготовлении растворов были использованы экстракты растений [11, 12]. В работах [13, 14] описаны свойства известковых штукатурок с добавками природных полисахаридов. Авторами установлена адсорбция органических веществ на поверхности кристаллов кальцита.

Представляет интерес исследование возможности применения синтетических полисахаридов при изготовлении известковых составов для реставрации объектов культурного наследия.

В работе применяли гашеную известь (пушонку) истинной плотностью 2230 кг/м^3 , насыпной плотностью 280 кг/м^3 , активностью 83 %, с удельной поверхностью $S_{\text{уд}} 559 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В качестве органической добавки применяли водорастворимые модифицированные полисахариды Atren Cem LV и Atren Cem HV (ТУ 2458-062-63121839-2014).

Когезионную прочность покрытий определяли по показателю прочности на осевое растяжение на образцах размером $10 \times 10 \times 50 \text{ мм}$ и вычисляли по формуле

$$R_p = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P – разрушающая сила, Н; F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м^2 .

На рис.1 приведены микрофотографии затвердевшего известкового вяжущего. Обнаруживаются цепочки округлых кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 1, а), также вытянутые многогранные пластинки карбоната кальция. Анализ снимков показывает малоконтрастные области нанометрового размера в отдельных кристаллах кальцита с неоднородностями, соответствующие аморфной (органической) фазе (рис. 1,б), подобные тем, которые наблюдаются в нескольких биоминералах CaCO_3 с окклюзированной органикой [8, 15, 16].

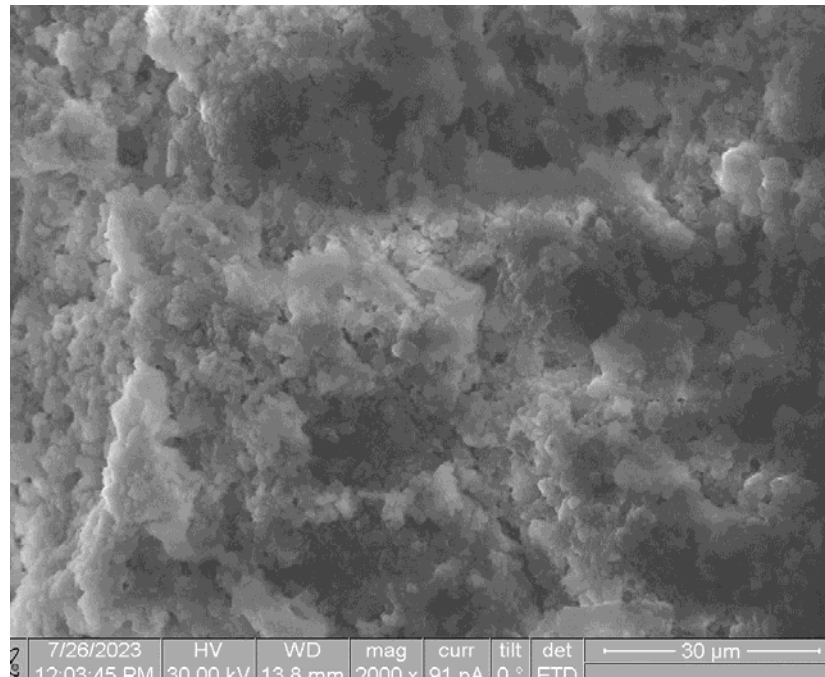
Наличие органики подтверждается анализом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (рис. 2). Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют о наличии числа мод поглощения, отвечающих органическим компонентам; на это указывают полосы валентных колебаний C—H при 2970 и 2870 см^{-1} .

Включение (адсорбция) добавок в/на кальцит подтверждается анализом TG/DSC (рис. 3,а) известковых образцов. Анализ термограмм образцов свидетельствует, что в контрольных образцах эндотермический эффект при температуре $849,5\text{--}999,7^\circ\text{C}$, (рис. 3,а, кривая 2) несколько больше по сравнению с образцами, содержащими полисахариды (рис. 3,а, кривые 1, 3). Это обусловлено наложением экзотермического эффекта, связанного с разложением органической добавки Atren Cem HV (рис. 3,б). Увеличение числовых значений эндотермического эффекта, связанного с разложением портландита, в образцах с добавкой полисахарида связано с наложением эндотермического эффекта при температуре от 400 до 550°C вследствие дегидратации и реакции декарбоксилирования Atren Cem HV, в результате которой образуются газообразные продукты сгорания с последующей окислительной деструкции продуктов разложения.

Вследствие водоудерживающего действия добавки создаются более благоприятные условия для карбонизации извести. Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют, что количество кальцита в контрольных образцах составляет 87,4 %, в образцах, приготовленных на извести, гашеной в присутствии добавки, – 92,26 % и в образцах, приготовленных с добавкой, – 88,87 %.

В совокупности эти результаты подтверждают присутствие как меж-, так и внутрикристаллических органических соединений, которые модифицируют структуру новообразованных кристаллов кальцита в различных масштабах, воспроизводя многоуровневые иерархические мезокристаллические особенности, наблюдаемые во многих биоминералах CaCO_3 и их биомиметиках, которые включают меж- и внутрикристаллические макромолекулы.

a



б

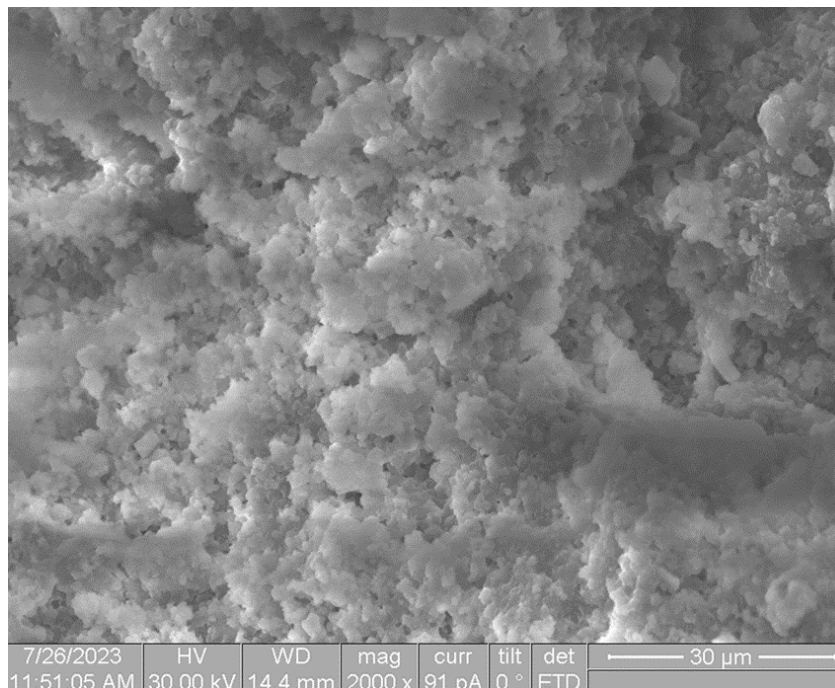


Рис. 1. Структура известкового затвердевшего камня:
а – контрольный состав; б – с добавкой полисахарида Atren Cem HV

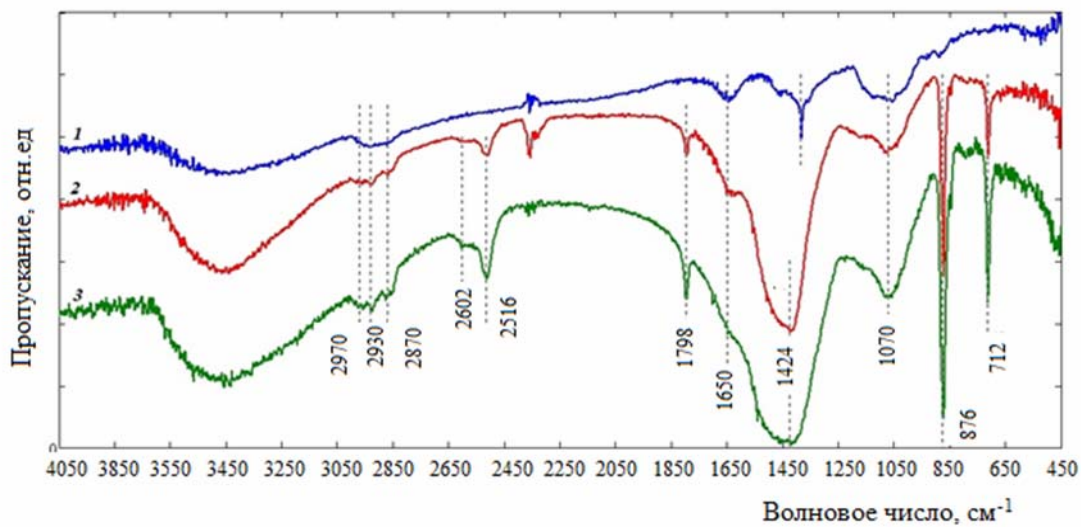
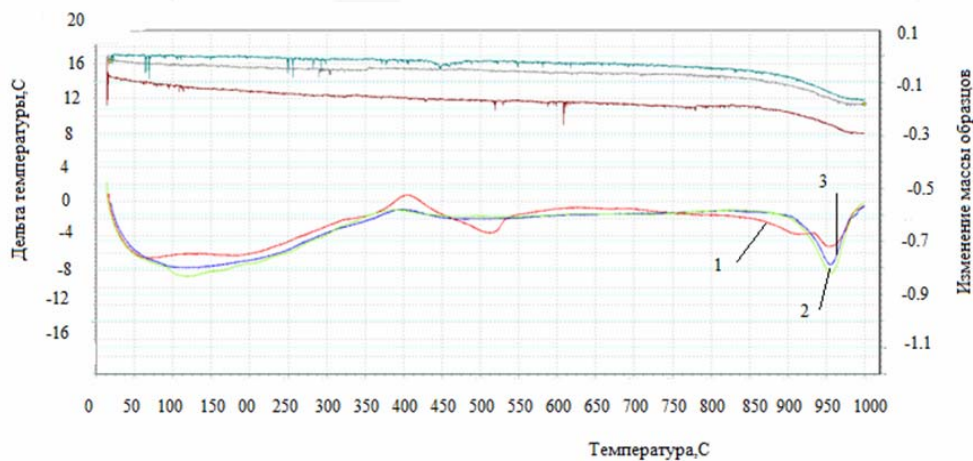


Рис. 2. ИК-спектры пропускания исследуемых образцов:

- 1 – водорастворимый модифицированный полисахарид Atren Cem HV;
 2 – контрольный состав; 3 – состав с добавкой полисахарида Atren Cem HV

а



б

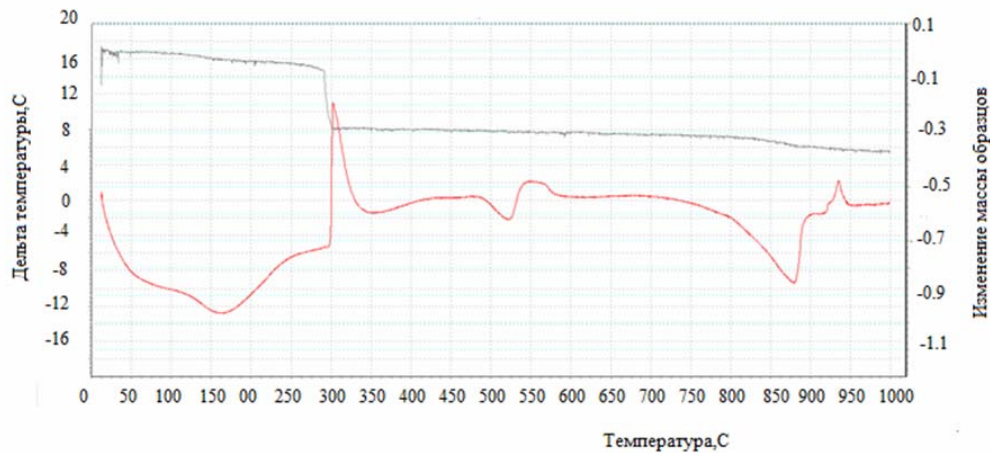


Рис. 3. Кривые дифференциально-термического анализа известковых образцов:

- а: 1 – гашеного в присутствии полисахарида; 2 – контрольного; 3 – с добавкой полисахарида;
 б: с добавкой полисахарида Atren Cem HV

Полисахариды вызывают эффект упрочнения, способствуя пластической деформации и, следовательно, препятствуя катастрофическому разрушению, вызванному действием внешних факторов. В табл. 1 приведены результаты оценки когезионной прочности покрытий.

Т а б л и ц а 1

Прочность при растяжении известковых образцов

Состав	Прочность при растяжении, МПа
Возраст твердения 28 суток	
Контрольный (известь+вода)	0,22
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести	0,24
Возраст твердения 3 месяца	
Контрольный (известь+вода)	0,264
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести	0,47
Состав с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5 % от массы извести	0,379

Полученные результаты свидетельствуют, что известковые составы с добавкой полисахаридов Atren Cem LV характеризуются более высокой когезионной прочностью. По мере увеличения возраста твердения рост когезионной прочности образцов с добавкой синтетического полисахарида Atren Cem LV проявляется в большей степени. Так, в возрасте 28 суток твердения когезионная прочность образцов на основе контрольного состава составляет $R=0,22$ МПа, а с добавкой полисахарида – 0,24 МПа. В возрасте 3 месяцев твердения различия в значениях когезионной прочности проявляются в большей степени. Когезионная прочность контрольных образцов составляет 0,264 МПа, а образцов с добавкой Atren Cem LV в количестве 1 % от массы извести – 0,47 МПа, с добавкой Atren Cem LV в количестве 0,5 % от массы извести – 0,379 МПа.

Список литературы

1. Bokan Bosiljkov, V. The use of industrial and traditional limes for lime mortars / V. Bokan Bosiljkov; Lourenco, P.B., Roca, P. (Eds.) // Historical Constructions. University of Minho, Guimaraes. – 2001. – P.343–352.
2. Бийтс, Р. Химические добавки для улучшения качества строительных растворов / Р. Бийтс, Х. Линденау // Строительные материалы. – 1999. – №3. – С. 14–18.
3. Loganina, V. Improving the durability of lime finishing mortars by modifying them with silicic acid sol / V. Loganina, O. Davydova, R. Fediuk, M. Amran, S. Klyuev, A. Klyuev, L. Sabitov, K. Nabiullina // Materials. – 2022. – №15. – 2360. – <https://doi.org/10.3390/ma15072360>
4. Логанина, В.И. Реологические свойства композиционного известкового вяжущего с применением синтетических цеолитов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Л.В. Макарова, М.А. Садовникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 4 (652). – С. 37–42.
5. Логанина, В.И. Перспективы изготовления органо-минеральной добавки на основе отечественного сырья / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, В.Н. Горбунов, Т.Н. Дмитриева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 9 (609). – С. 36–39.
6. Логанина, В.И. Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 3 (627). – С. 20–23.

7. Логанина, В.И. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей / В.И. Логанина, М.В. Фролов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5 (52). – С. 144–147.
8. Yang, Fuwei. Study of Sticky Rice-Lime Mortar Technology for the Restoration of Historical Masonry Construction / Fuwei Yang, Bingjian Zhang, Qinglin Ma // Accounts of Chemical Research. – 2010. – № 43 (6). – P. 936–944.
9. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P.Degryse, J.Elsen, M. Waelkens // Cement and Concrete Research. – 2002. — №32(1457). – P.63.
10. Genestar, C. Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization / C. Genestar, C.Pons // Journal of Cultural Heritage. – 2002. – №4. – P.291–298.
11. Artioli, G. The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world / G. Artioli, M. Secco, A. Addis // EMU Notes Miner. – 2019. – №20. – P.151–202.
12. Elert, K. Degradation of ancient Maya carved tuff stone at Copan and its bacterial bioconservation / K. Elert, E. Ruiz-Agudo, F. Jroundi, M. T. Gonzalez-Muñoz, B.W. Fash, W. L. Fash, N. Valentin, A.de Tagle, C. Rodriguez-Navarro // Mater. Degrad. – 2021. – №5. – P.44.
13. Littmann, E.R. Ancient Mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: The use of bark extracts in lime plasters / E.R. Littmann // Am. Antiquity. – 1960. – №25. – P.593–597.
14. Magaloni, D. Studies on the Mayan mortars technique / D. Magaloni, R. Pancella, Y. Fruh, J. Cañetas, V. Castaño // MRS Online Proc. Lib. – 1995.– 352. – 483.
15. Rodriguez-Navarro, C. Crystallization and colloidal stabilization of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the presence of nopal juice (*Opuntia ficus indica*): Implications in architectural heritage conservation / C. Rodriguez-Navarro, E. Ruiz-Agudo, A. Burgos-Cara, K. Elert, E. Hansen // Langmuir. – 2017. – №33. – P. 10936–10950.
16. Pokroy, B. The microstructure of biogenic calcite: A view by high-resolution synchrotron powder diffraction / B. Pokroy, A. Fitch, E. Zolotoyabko // Adv. Mater. – 2006. – 18. – P.2363–2368.

References

1. Bokan Bosiljkov, V. The use of industrial and traditional limes for lime mortars / V. Bokan Bosiljkov; Lourenco, P.B., Roca, P. (Eds.) // Historical Constructions. University of Minho, Guimaraes. – 2001. – P.343–352.
2. Beates, R. Chemical additives to improve the quality of building mortars / R. Beates, H. Lindenau // Construction materials. – 1999. – No. 3. – P. 14–18.
3. Loganina, V. Improving the durability of lime finishing mortars by modifying them with silicic acid sol / V. Loganina, O. Davydova, R. Fediuk, M. Amran, S. Klyuev, A. Klyuev, L. Sabitov, K. Nabiullina // Materials. – 2022. – №15. – 2360. – <https://doi.org/10.3390/ma15072360>
4. Loganina, V.I. Rheological properties of composite lime binder using synthetic zeolites / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, L.V. Makarova, M.A. Sadovnikova // News of higher educational institutions. Construction. – 2013. – No. 4 (652). – P. 37–42.
5. Loganina, V.I. Prospects for the production of organo-mineral additives based on domestic raw materials / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, V.N. Gorbunov, T.N. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Construction. – 2009. – No. 9 (609). – P. 36–39.
6. Loganina, V.I. The influence of diatomite activation on the properties of lime compositions / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // News of higher educational institutions. Construction. – 2011. – No. 3 (627). – P. 20–23.
7. Loganina, V.I. Fine filler based on calcium silicates for lime mixtures / V.I. Loganina, M.V. Frolov // Bulletin of Civil Engineers. – 2015. – No. 5 (52). – P. 144–147.
8. Yang, Fuwei. Study of Sticky Rice-Lime Mortar Technology for the Restoration of Historical Masonry Construction / Fuwei Yang, Bingjian Zhang, Qinglin Ma // Accounts of Chemical Research. – 2010. – № 43 (6). – P. 936–944.

9. Degryse, P. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation / P.Degryse, J.Elsen, M. Waelkens // *Cement and Concrete Research*. – 2002. – №32(1457). – P.63.
10. Genestar, C. Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization / C. Genestar, C.Pons // *Journal of Cultural Heritage*. – 2002. – №4. – P.291–298.
11. Artioli, G. The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world / G. Artioli, M. Secco, A. Addis // *EMU Notes Miner.* – 2019. – №20. – P.151–202.
12. Elert, K. Degradation of ancient Maya carved tuff stone at Copan and its bacterial bioconservation / K. Elert, E. Ruiz-Agudo, F. Jroundi, M. T. Gonzalez-Muñoz, B.W. Fash, W. L. Fash, N. Valentin, A.de Tagle, C. Rodriguez-Navarro // *Mater. Degrad.* – 2021. – №5. – P.44.
13. Littmann, E.R. Ancient Mesoamerican mortars, plasters, and stuccos: The use of bark extracts in lime plasters / E.R. Littmann // *Am. Antiquity*. – 1960. – №25. – P.593–597.
14. Magaloni, D. Studies on the Mayan mortars technique / D. Magaloni, R. Pancella, Y. Fruh, J. Cañetas, V. Castaño // *MRS Online Proc. Lib.* – 1995. – 352. – 483.
15. Rodriguez-Navarro, C. Crystallization and colloidal stabilization of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the presence of nopal juice (*Opuntia ficus indica*): Implications in architectural heritage conservation / C. Rodriguez-Navarro, E. Ruiz-Agudo, A. Burgos-Cara, K. Elert, E. Hansen // *Langmuir*. – 2017. – №33. – P. 10936–10950.
16. Pokroy, B. The microstructure of biogenic calcite: A view by high-resolution synchrotron powder diffraction / B. Pokroy, A. Fitch, E. Zolotoyabko // *Adv. Mater.* – 2006. – 18. – P.2363–2368.

УДК 691.327:666.97-136

DOI 10.54734/20722958_2024_4_88

*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***Очкина Наталья Александровна**,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Физика и химия»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru**Лаврова Ольга Владимировна**,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: olya.lavrova.60@mail.ru**Шмарова Татьяна Сергеевна**,
старший преподаватель кафедры «Физика
и химия»
E-mail: shmarovats@yandex.ru**Очкин Игорь Анатольевич**,
магистрант
E-mail: ochkin@ogroup.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***Ochkina Natalia Aleksandrovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
«Physics and Chemistry»
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru**Lavrova Olga Vladimirovna**,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
«Building structures»
E-mail: olya.lavrova.60@mail.ru**Shmarova Tatyana Sergeevna**,
Senior Lecturer of the Department «Physics
and Chemistry»
E-mail: shmarovats@yandex.ru**Ochkin Igor' Anatol'yevich**,
Master student
E-mail: ochkin@ogroup.ru

РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ВЫСОКОПЛОТНЫЕ КОМПОЗИТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.А. Очкина, О.В. Лаврова, Т.С. Шмарова, И.А. Очкин

Определены технологии получения высокоэффективных радиационно-защитных композитов на основе высокоглиноземистого цемента с высокоплотным наполнителем (полиминеральный отход стекольной промышленности). Указаны физико-механические свойства полученных композитов. Представлены результаты экспериментального исследования радиационно-защитных свойств композитов. В измерениях использовались: рентгеновская трубка 0,3БВП6-150W (энергия квантов $\sim 0,07$ МэВ), стационарный рентгеновский аппарат РАП150/300 с рентгеновской трубкой направленного действия 1,2-ЗБПМ5-300 (энергия квантов $\sim 0,166$ МэВ), изотопный источник γ -излучения Co-60 (энергия квантов $\sim 1,25$ МэВ), линейный ускоритель электронов SL7-5 N3141, генерирующий тормозное излучение (пучок γ -квантов с энергией ~ 6 МэВ), линейный ускоритель электронов Elekta Medical Linear Accelerator, работающий в режиме тормозного излучения с граничной энергией 18 МэВ. Показано, что композиты с высокоплотным наполнителем на высокоглиноземистом цементе особенно эффективны для защиты от рентгеновского излучения с энергией квантов до 0,2 МэВ и жесткого γ -излучения с энергией квантов более 5 МэВ, а также эффективнее обычных бетонов ослабляют потоки быстрых нейтронов. При одинаковой кратности ослабления нейтронного излучения толщина защиты из композита с высокоплотным наполнителем на высокоглиноземистом цементе $\sim 1,4$ раза меньше, чем из бетона.

Ключевые слова: композит, γ -излучение, нейтронное излучение, радиационно-защитные свойства, высокоплотный наполнитель, высокоглиноземистый цемент

RADIATION-PROTECTIVE HIGH-DENSITY COMPOSITES FOR SPECIAL PURPOSES

N.A. Ochkina, O.V. Lavrova, T.S. Shmarova, I.A. Ochkin

The technologies for producing highly effective radiation-protective composites based on high-alumina cement with a high-density filler (polyminerall waste from the glass industry) are determined.

The physical and mechanical properties of the obtained composites are indicated. The results of an experimental study of the radiation-protective properties of the composites are presented. The following devices have been used in the measurements: a 0.3BVP6-150W X-ray tube (quantum energy ~ 0.07 MeV), a RAP150/300 stationary X-ray machine with a 1.2-3BPM5-300 directional X-ray tube (quantum energy ~ 0.166 MeV), a Co-60 isotope γ -radiation source (quantum energy ~ 1.25 MeV), a SL7-5 N3141 linear electron accelerator generating bremsstrahlung (a beam of γ -quanta with an energy of ~ 6 MeV), and an Elekta Medical Linear Accelerator operating in bremsstrahlung mode with a cutoff energy of 18 MeV. It is shown that composites with high-density filler on high-alumina cement are especially effective for protection against X-ray radiation with quantum energy up to 0.2 MeV and hard γ -radiation with quantum energy more than 5 MeV, and also more effectively weaken fast neutron flows than conventional concrete. With the same attenuation factor of neutron radiation, the thickness of the protection made of a composite with high-density filler and high-alumina cement is ~ 1.4 times less than that of the concrete.

Keywords: composite, γ -radiation, neutron radiation, radiation-protective properties, high-density filler, high-alumina cement

Интенсивное внедрение ядерных технологий в медицину связано с решением ряда проблем по защите персонала от фотонного и нейтронного излучений и упаковке ядерных отходов. Предполагается, что наиболее целесообразным и эффективным радиационно-защитным материалом является бетон. При строительстве помещений для лучевой терапии используются различные типы бетонов. Так, в работах [1, 2] приводятся результаты исследований защитных свойств обычного, гематит-серпентинитового, ильменит-лимонитового, базальт-магнетитового, хромитового и сталемагнетитового бетонов в области энергий излучения 0,015–15,0 МэВ. Плотность бетонов варьируется от 2300 до 5110 кг/м³. Наибольшую радиационную стойкость имеют бетоны на хромитовом заполнителе. Показатель радиационной стойкости для них составляет 10^{21} нейтрон/см², что значительно выше, чем для композита на кварцевом песке – $2 \cdot 10^{19}$ нейтрон/см².

В [3...6] показано значительное преимущество использования в качестве крупного заполнителя тонкомолотого наполнителя для радиационно-защитных бетонов полиминерального отхода стекольного производства (ПМО) с плотностью 5100 кг/м³, имеющего эффективный химический состав, включающий 70,9 % PbO. В качестве вяжущего применялись: [3] – эпоксидная смола, [4] – жидкое стекло, [5] – портландцемент и [6] – сера. Бетоны на ПМО эффективно защищают от рентгеновского излучения с энергией квантов до 0,2 МэВ и жесткого γ -излучения с энергией квантов более 5 МэВ. В указанных интервалах энергий линейный коэффициент ослабления излучения у таких бетонов практически на порядок выше, чем у бетонов на обычных заполнителях [5].

Для повышения защитных свойств бетонов от нейтронного излучения проектируют составы с более высоким содержанием водорода по сравнению с обычным бетоном. Для изготовления таких бетонов целесообразно применение глиноземистого и высокоглиноземистого (ВГЦ) цементов. В цементном камне на основе ВГЦ содержится 25...35 % (по массе) химически связанной воды, тогда как в обычном портландцементном – 15...17 %. Кроме того, важное преимущество ВГЦ состоит в быстром наборе прочности. Через сутки с момента затворения его прочность составляет 80...90 % прочности, получаемой в 28-суточном возрасте. Это позволяет рекомендовать ВГЦ в качестве вяжущего для создания композитов, предназначенных для срочного возведения и восстановления специальных сооружений защиты от радиоактивных воздействий.

Исследуемый материал получали из смеси, включающей отдозированные количества ВГЦ, заполнителя, наполнителя и воды, с коэффициентом подвижности ($1,76 \pm 0,10$) путем виброуплотнения (частота колебаний виброплощадки 3000 в минуту при амплитуде 0,5 мм) до появления на поверхности жидкой фазы и прекращения интенсивного образования пузырьков воздуха, осуществляя контроль коэффициента уплотнения (не менее 0,98). Подвижность играет важную роль в случае заполнения полостей конструкции защиты для предотвращения образования в них пустот. Последующее твердение осуществлялось при соблюдении температурно-влажностного режима: для предотвращения преждевременного усыхания материала его укрывали

пленкой в течение первых двух суток при 20...22°C. Распалубка изделий производилась через трое суток. Для исследований использовались блоки размерами 200×200×50 мм, дополнительно подвергшиеся термической обработке при 400°C до постоянной массы. Химический состав разработанного композита приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав высокоплотного композита

Компоненты	Химические элементы, кг/м ³									
	H	O	Si	Al	Fe	Ca	Pb	K	Na	As
ПМО (фракция 0,63...1,25 мм)	–	478,2	302,7	–	–	–	1678	25,4	8,91	5,46
ПМО ($S_{\text{уд}} = 100 \text{ м}^2/\text{кг}$)	–	204,9	129,7	–	–	–	677,8	10,85	3,82	2,34
ВГЦ	–	178,7	1,41	167,7	1,2	69,03	–	–	–	–
Вода	13,93	111,6	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего	13,93	973,4	433,8	167,7	1,2	69,03	2356	36,25	12,73	7,8

Композит, изготовленный на основе ВГЦ и ПМО, характеризуется рядом положительных свойств: высокой средней плотностью, непроницаемостью, термостойкостью, химической стойкостью, быстрым набором и относительно высокими значениями ранней прочности, а также простотой технологии изготовления и т.д. (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Физико-механические свойства композита

Показатель	Численное значение
Средняя плотность, кг/м ³	3992...4120
Предел прочности при сжатии после 3 сут. твердения, МПа	40...54
Предел прочности при изгибе после 3 сут. твердения, МПа	5,72...7,72
Пористость, %	3,85...6,88
Водопоглощение по массе, %	1,31...2,32
Статический модуль упругости, МПа	$(4,11...4,2) \cdot 10^4$
Динамический модуль упругости, МПа	$(4,19...4,39) \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона	0,2...0,23
Усадочные деформации, %	0,036...0,096
Температурный коэффициент линейного расширения, К ⁻¹	$(7,1...7,3) \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	1071...1187
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,47...0,51
Адгезионная прочность, МПа	1,2...2,2
Коэффициент линейного ослабления γ -излучения с энергией квантов 1,25 МэВ, см ⁻¹	0,221...0,225
Коэффициент радиационной стойкости (при поглощенной дозе 1,5 МГр)	0,96

Исследования по изучению влияния вида заполнителя на защитные свойства композитов на основе ВГЦ выполняли на образцах со степенью наполнения $f = 0,66$ и водоцементным отношением В/Ц=0,5 (табл. 3).

Линейные коэффициенты ослабления определяли, облучая образцы узким пучком рентгеновских лучей с энергией фотонов 0,07 и 0,166 МэВ и γ -квантов с энергией 1,25 и 6 МэВ, созданным путем специального диафрагмирования. В последнем случае условия эксперимента были таковы, что детектор излучения, расположенный за поглотителем, не регистрировал рассеянных γ -квантов.

В соответствии с законом ослабления узкого пучка излучения

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad \mu = \frac{\lg \frac{I}{I_0}}{d \lg(e)};$$

здесь I_0 – интенсивность падающего излучения; I – интенсивность излучения, прошедшего через материал защиты; d – толщина материала защиты, см; μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см^{-1} .

Т а б л и ц а 3

Связь вида заполнителя и защитных свойств композитов от рентгеновского и γ -излучений

№ состава	Вид наполнителя	Средняя плотность, кг/м^3	Коэффициент ослабления, см^{-1} излучения с энергией, МэВ			
			0,07	0,166	1,25	6
1	Кварцевый песок	2298	0,582	0,314	0,128	0,072
2	Барит	2836	0,740	0,636	0,158	0,084
3	ПМО	4045	1,964	0,906	0,225	0,146

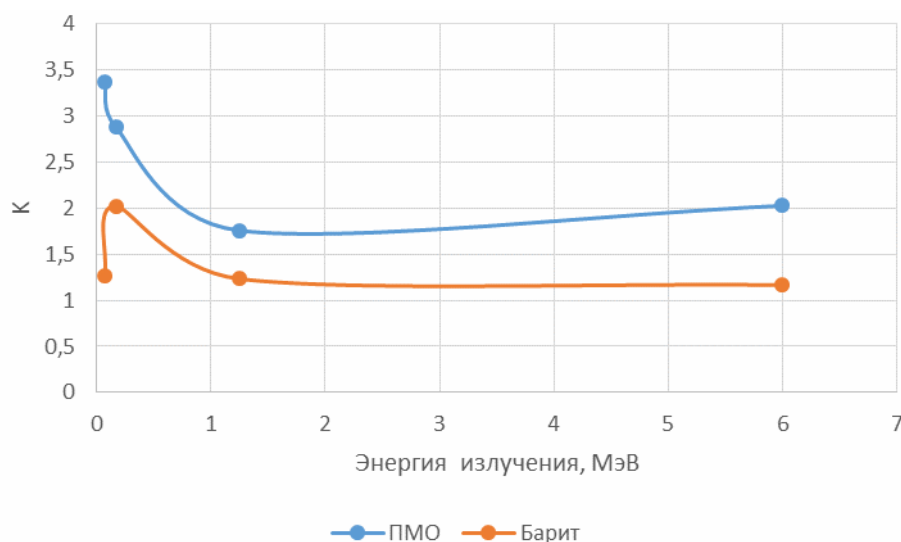


Рис. 1. Зависимость коэффициента k , показывающего, во сколько раз коэффициент линейного ослабления данного композита больше, чем у композита на кварцевом песке от энергии излучения

Ослабление рентгеновского ионизирующего излучения происходит тем сильнее, чем меньше энергия квантов излучения и больше плотность материала защиты (см. табл. 3 и рис. 1). У наиболее плотных композитов на ПМО линейный коэффициент ослабления рентгеновских лучей в среднем в 3,12 раза больше, чем у композитов на кварцевом песке, и в 1,36 раза больше, чем у образцов с наполнителем из барита. В интервале энергий γ -излучений 1,25-6 МэВ композиты на ПМО эффективнее защищают от излучения с большей энергией квантов.

Обычно между детектором излучения и поглотителем отсутствуют специальные диафрагмы. При таких условиях рассеянные кванты попадают в детектор излучения. Очевидно, что при одной и той же толщине поглотителя в условиях широкого пучка происходит меньшее ослабление интенсивности излучения и закон ослабления излучения имеет вид

$$I = I_0 e^{-\mu d} \cdot B(h\nu, \mu d, z),$$

где $B(h\nu, \mu d, z)$ – фактор накопления (поправочный коэффициент, который учитывает влияние рассеянного излучения плюс любых вторичных частиц в среде при расчетах экранирования).

Накопление излучения зависит в первую очередь от энергии γ -квантов, толщины, коэффициента поглощения, атомного номера химического элемента, входящего в состав материала защиты, а также от ряда параметров, характеризующих геометрию широкого пучка. Влияние некоторых из них (размеры поля облучения защитного экрана и расстояние между детектором и поглотителем) на величину фактора накопления обычного бетона исследовано в работах А.Н. Комаровского.

Фактор накопления обычно осложняет проектирование радиационной защиты. В геометрии широкого пучка кванты излучения, пройдя через вещество, испытывают один или несколько актов рассеяния и попадают в регистрирующий прибор под различными углами. Интенсивность рассеянного излучения в некоторой точке пространства связана с угловым распределением рассеянных квантов, которое зависит не только от энергии излучения и толщины поглотителя, но и от конфигурации поглотителя и детектора излучения и их взаимного расположения в пространстве. Поэтому при изучении ослабления широкого пучка γ -излучения удобнее пользоваться понятиями дозы и дозового фактора накопления, поскольку именно доза определяет степень воздействия излучения на материал, и большинство дозиметрических приборов измеряют дозу излучения, а не интенсивность.

Если P_0 – мощность дозы излучения в данной точке в отсутствии поглотителя, а P – мощность дозы излучения в этой точке после прохождения слоя поглотителя толщиной d , то

$$P = P_0 e^{-\mu d} \cdot B_D(h\nu, \mu d, z),$$

где $B_D(h\nu, \mu d, z)$ – дозовый фактор накопления, учитывающий вклад рассеянного излучения в значение дозы после прохождения излучения через поглотитель в геометрии широкого пучка.

Дозовый фактор накопления показывает, во сколько раз доза излучения, прошедшего через поглотитель в условиях широкого пучка, больше, чем в условиях узкого пучка.

В экспериментах с каждым образцом по определению дозового фактора накопления и исследованию его зависимости от размеров поля облучения на поверхности образца такие параметры, как энергия излучения, толщина и физические свойства образца, а также положение детектора были заданы и оставались постоянными. Изменялась ширина пучка на поверхности образца. Делались замеры кратности ослабления излучения при различных размерах пучка на поверхности образца, начиная с минимального – 4×4 см², при котором угловое распределение излучения не более $1,4^\circ$. Эксперимент проводили при энергиях излучения 1,25 и 6 МэВ.

Для каждого из исследуемых материалов увеличение размеров поля облучения приводит к росту дозового фактора накопления (рис. 2 и 3). При прочих равных условиях фактор накопления уменьшается с ростом энергии излучения. Наибольшее значение дозового фактора накопления для композита с заполнителем из ПМО, чем при использовании других заполнителей, можно объяснить содержанием в составе ПМО большего числа элементов с большими атомными номерами, на которых происходит более интенсивное рассеяние γ -квантов. Кроме того, при облучении образцов γ -квантами с энергией 6 МэВ существенную роль играет следующее обстоятельство. Энергия, соответствующая минимальному значению коэффициента ослабления в узком пучке, для кремния составляет 21 МэВ; для бария и свинца – 3,9 МэВ и 3,4 МэВ соответственно. Так как энергия первичных квантов (6 МэВ) превышает величину энергии, соответствующей минимальному значению коэффициента ослабления для бария и свинца (основных элементов баритового композита и композита с заполнителем из ПМО), то рассеянное излучение, деградировавшее по энергии до минимального, оказывается наиболее проникающим и вносит решающий вклад в процесс

ослабления (увеличивает долю рассеянного излучения в составе излучения, прошедшего через материал образца).

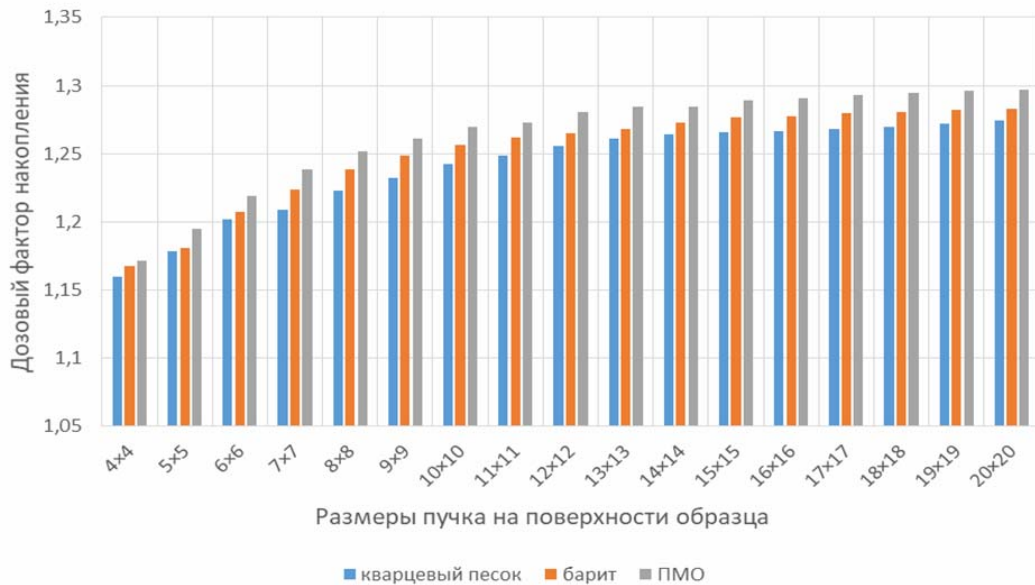


Рис. 2. Дозовые факторы накопления при энергии квантов излучения 1,25 МэВ

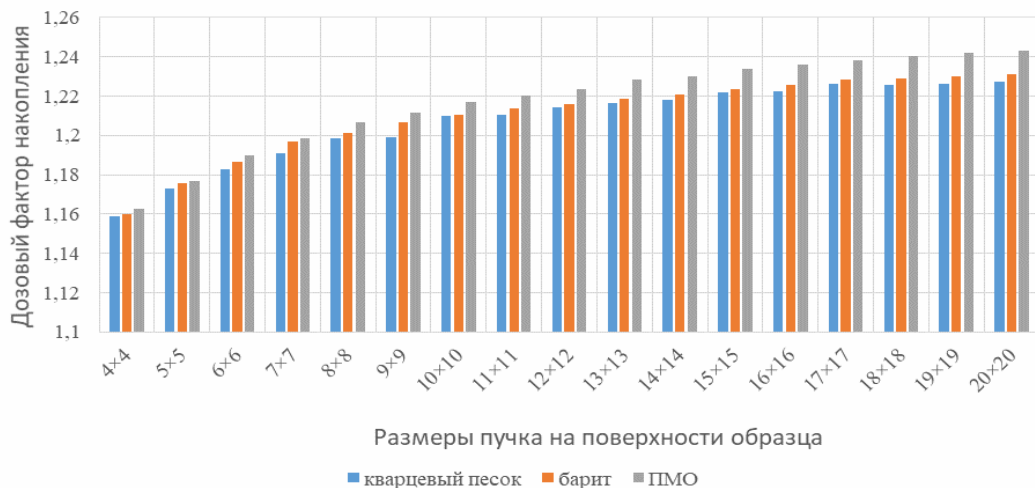


Рис. 3. Дозовые факторы накопления при энергии квантов излучения 6 МэВ

В настоящее время телетерапевтические аппараты из кобальта и цезия в медицинских учреждениях заменяются линейными ускорителями. Максимальная энергия фотонов в этих установках может варьироваться от 4 до 25 МэВ, и одним из больших преимуществ такого оборудования является то, что в него не встроен радиоактивный источник. Высокоэнергетические ($E > 10$ МэВ) медицинские линейные ускорители обладают рядом физических преимуществ по сравнению с низкоэнергетическими: доза облучения кожи ниже, луч проникает глубже, а рассеянная доза в тканях за пределами целевого объема меньше. Тем не менее, загрязнение терапевтического пучка нежелательными нейтронами, генерируемыми фотонами высокой энергии, стало дополнительной проблемой, поскольку речь идет о защите пациентов и профессиональных дозах. Стены процедурного кабинета экранированы для ослабления первичного и вторичного потоков рентгеновских лучей, и этого экранирования, как правило, достаточно для ослабления нейтронов. Однако эти нейтроны рассеиваются по лабиринту процедурного кабинета и могут привести к радиологической проблеме у входа в помещение с высокой загруженностью в отделении лучевой терапии.

В данном эксперименте исследовались потоки вторичных нейтронов на линейном медицинском ускорителе Elekta Medical Linear Accelerator, работающем в режиме тормозного излучения с граничной энергией 18 МэВ. В процессе эксперимента он был ориентирован вертикально вниз с углом поворота гантри (подвижного устройства для удерживания и нацеливания оборудования на зафиксированный объект) и коллиматора, равным 0° . Мощность дозы излучения составляла 420 МЕ/мин. Средняя энергия прямых нейтронов от головки ускорителя порядка 0,5 МэВ, а энергия нейтронов, рассеянных от стен, снижается до тепловой – 0,025 МэВ.

Для измерения количества быстрых и тепловых нейтронов использовали пару термолюминесцентных дозиметрических детекторов TLD 600 и TLD 700.

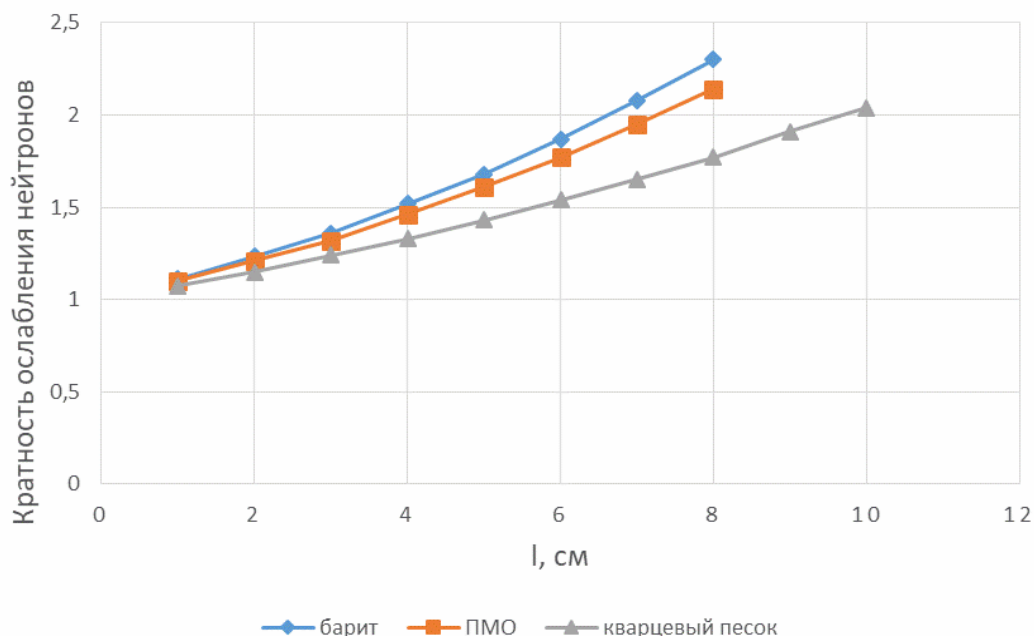


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления потока быстрых нейтронов от толщины слоя защиты

Обычно величина макроскопического поперечного сечения вывода быстрых нейтронов, представляющего собой эффективную площадь мишени для всех ядер, содержащихся в объеме материала, определяется эмпирически, и идеальные условия её измерения описаны в различных ссылках, например Glasstone и Sesonske (1986). При отсутствии условий проведения удовлетворительного эксперимента для оценки величины макроскопического поперечного сечения вывода исследуемых образцов воспользовались полуэмпирическим методом, позволяющим рассчитать ослабление быстрых нейтронов в гетерогенной защите:

$$\sum_{\text{выб}}^{\text{компози́та}} = \sum_{i=1}^n \sigma_{\text{выб}}^i \rho_i,$$

$\sum_{\text{выб}}^{\text{компози́та}}$ – макроскопическое сечение вывода композита (эта величина определяет вероятность взаимодействия нейтрона с ядром на сантиметр пробега нейтрона); $\sigma_{\text{выб}}^i$ – микроскопическое сечение вывода i -го химического элемента, входящего в состав композита (значения $\sigma_{\text{выб}}$ для каждого элемента, входящего в состав композита, приводятся в специальных справочниках); ρ_i – ядерная концентрация i -го химического элемента.

Ядерная концентрация (число ядер в 1 см^3) определялась как

$$\rho_i = \frac{N_A K_i}{A_i},$$

N_A – постоянная Авогадро, равная $6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$; K_i и A_i – содержание (г/см³) и атомная масса i -го элемента, входящего в состав данного композита, соответственно.

Для каждого из образцов определялась длина релаксации (толщина слоя защиты, уменьшающего интенсивность нейтронного излучения в e раз) (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Влияние вида заполнителя на защитные свойства композитов от потока быстрых нейтронов

№ состава	Вид наполнителя	Средняя плотность, кг/м ³	Длина релаксации, см	Макроскопическое сечение выведения быстрых нейтронов, см ⁻¹
1	Кварцевый песок	2298	13,89	0,072
2	Барит	2836	9,52	0,101
3	ПМО	4045	10,42	0,096

Оказалось (рис. 4, табл. 4), что по габаритным показателям предпочтительным вариантом является композит с заполнителем из барита. Он наиболее эффективен для защиты от потока быстрых нейтронов благодаря содержанию бария с достаточно высоким микроскопическим сечением выведения быстрых нейтронов ($0,105 \text{ см}^{-1}$). У предлагаемого композита с заполнителем из ПМО на портландцементе величина $\sum_{\text{выв}}^{\text{композита}} = 0,085 \text{ см}^{-1}$, что сравнимо с обычным бетоном. При использовании в качестве вяжущего ВГЦ значение макроскопического сечения выведения нейтронов возрастает на 13 %. Увеличение поперечного сечения выведения нейтронов сопровождается уменьшением длины релаксации, и поглощение нейтронов происходит в основном в поверхностном слое защиты. Высокоплотные композиты на ПМО и ВГЦ обладают хорошими экранирующими свойствами, и использование их для изготовления облицовочной плитки и радиационно-защитных штукатурок стен рентгеновских кабинетов и помещений для эксплуатации линейных ускорителей, применяемых в медицинских учреждениях для лучевой терапии, является более выгодным не только с экономической, но и с практической точки зрения.

Список литературы

1. Каур, О. Сравнительные исследования различных бетонов на основе некоторых параметров взаимодействия фотонов /О. Каур, Д.К. Шарма, П.С. Сингх// Приложение Radiat Isot. – 2012. – (70)1. – С. 233–240.
2. Тарутин, И.Г. Радиационная защита в лучевой терапии: монография / И.Г. Тарутин, Г.В. Гацкевич, Е.В. Титович. – Минск: Белорусская наука, 2015. – 212 с.
3. Бормотов, А.Н. Моделирование влияния модифицирующих добавок на реологические показатели композитов / А.Н. Бормотов, А.А. Горохова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – №4(106). – С. 51–57.
4. Гришина, А.Н. Жидкостекольные материалы специального назначения: монография / А.Н. Гришина, Е.В. Королев; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – М.: МГСУ, 2015. – 224 с.
5. Калашников, В.И. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Д.В. Калашников, К.Н. Махамбетова // Строительные материалы, 2011. – №8. – С. 25–28.
6. Болтышев, С.А. Серные бетоны для защиты от радиации: моногр. / С.А. Болтышев, А.М. Данилов, Е.В. Королев. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 174 с. – ISBN 978-5-9282-1035-9

References

1. Kaur, O. Comparative studies of different concretes based on some parameters of photon interaction /O. Kaur, D.K. Sharma, P.S. Singh // Radiat Isot Supplement. – 2012. – (70)1. – P. 233–240.
2. Tarutin, I.G. Radiation protection in radiation therapy: monograph / I.G. Tarutin, G.V. Gatskevich, E.V. Titovich. – Minsk: Belarusian Science, 2015. – 212 p.
3. Bormotov, A.N. Modeling the effect of modifying additives on the rheological properties of composites / A.N. Bormotov, A.A. Gorokhova // International Research Journal. – 2021. – No. 4 (106). – P. 51–57.
4. Grishina, A.N. Liquid glass materials for special purposes: monograph / A.N. Grishina, E. V. Korolev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow State University of Civil Engineering. – M.: MGSU, 2015. – 224 p.
5. Kalashnikov, V. I. Optimization of the composition of especially heavy high-strength concrete for radiation protection / V. I. Kalashnikov, V. S. Demyanova, D. V. Kalashnikov, K. N. Makhambetova // Construction materials. – 2011. – No. 8. – P. 25–28.
6. Boltyshev, S.A. Sulfur concretes for radiation protection: monograph / S.A. Boltyshev, A.M. Danilov, E.V. Korolev. – Penza: PSUAS, 2014. – 174 p. – ISBN 978-5-9282-1035-9.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 69.04

DOI 10.54734/20722958_2024_4_97

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

Республика Мордовия, 430005, г. Саранск,
Большевикская, д. 68

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

Бабушкина Дельмира Рафиковна,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Безрукова Евгения Сергеевна,
аспирант кафедры «Строительные
конструкции»
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Селяева Софья Павловна,
магистрант

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

Republic of Mordovia, 430005, Saransk,
68, Bolshevistskaya

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

Babushkina Delmira Rafikovna,
Postgraduate student of the Department
"Building Structures"
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Bezrukova Evgeniya Sergeevna,
Postgraduate student of the Department
"Building Structures"
E-mail: eugenia.bezr@gmail.com

Selyaeva Sofya Pavlovna,
Undergraduate student

ПОПЕРЕЧНАЯ СИЛА, ВОСПРИНИМАЕМАЯ БЕТОНОМ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ

В.П. Селяев, Д.Р. Бабушкина, Е.С. Безрукова, С.П. Селяева

Предложена расчетная модель для определения поперечной силы Q_b , воспринимаемой бетоном при разрушении железобетонных элементов по наклонным сечениям.

На основе теории прочности Кулона–Навье получены формулы для определения поперечных сил, воспринимаемых бетоном в момент образования наклонной трещины Q_{bcr} и в момент разрушения Q_b железобетонного элемента по наклонной трещине. Полученные формулы не противоречат принятой методике расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов и отвечают принципам соответствия Н. Бора.

Ключевые слова: поперечная сила, теория прочности, железобетон, разрушение, наклонные сечения

THE TRANSVERSE FORCE PERCEIVED BY CONCRETE DURING THE DESTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE BENDING ELEMENTS ALONG INCLINED SECTIONS

V.P. Selyaev, D.R. Babushkina, E.S. Bezrukova, S.P. Selyaeva

The article proposes a computational model for determining the transverse force Q_b perceived by concrete during the destruction of reinforced concrete elements along inclined sections.

Based on the Coulomb-Navier strength theory, the formulas are obtained for determining the transverse forces perceived by concrete at the moment of formation of an inclined crack Q_{bcr} and at the moment of destruction Q_b of a reinforced concrete element along an inclined crack. The formulas obtained do not contradict the accepted methodology for calculating the strength of inclined sections of bent reinforced concrete elements and comply with the principles of compliance of N. Bohr.

Keywords: transverse force, strength theory, reinforced concrete, fracture, inclined sections

Разрушение железобетонных изгибаемых элементов по наклонным сечениям может происходить как под действием изгибающих моментов, так и под действием поперечных сил. О.Я. Берг предполагал, что разрушение бетона в сжатой зоне происходит под действием усилия, равного сумме сжимающего усилия от действия изгибающего момента в расчетном сечении и поперечной силы Q [1]. Под действием изгибающего момента M в поперечном сечении возникает сжимающая сила N_b , равная $N_b = M / z$ (z – плечо внутренней пары сил N_b и N_s).

При совместном действии поперечных Q и продольных $N_b = M / z$ сил формируется наклонная трещина под углом α к нейтральной оси $\operatorname{tg} \alpha = Qz / M$.

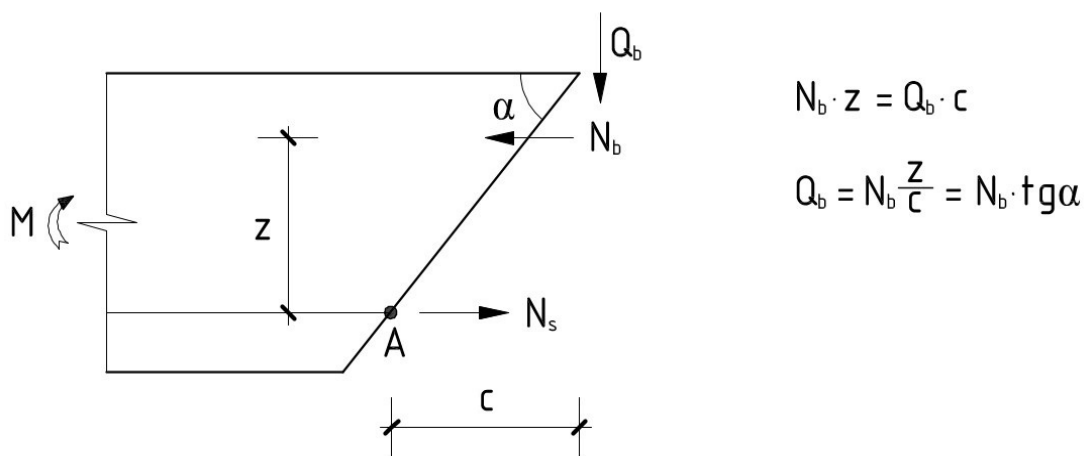


Рис. 1. Модель О.Я. Берга

На основе этих простых рассуждений было предложено для определения предельной поперечной силы, воспринимаемой бетоном, применять формулу вида:

$$Q_b = \frac{M}{z} \operatorname{tg} \alpha = N_b \operatorname{tg} \alpha = N_b \frac{h_0}{c}, \quad (1)$$

где N_b – сила, воспринимаемая бетоном сжатой зоны, $N_b = R_{bu} b h_0 \xi$ (R_{bu} – прочность бетона на сжатие при изгибе; $h_0 \xi = x$ – высота сжатой зоны бетона над вершиной трещины).

Подставив выражение для N_b в формулу (1), можем записать:

$$Q_b = \xi R_{bu} b h_0^2 / c. \quad (2)$$

Рассмотрим расчетную схему работы железобетонного элемента с одиночным армированием при изгибе (см. рис. 1). Возможны два случая: бетон сжатой зоны работает в упругой стадии (1) или пластической (2); должно соблюдаться условие $N_s = N_b$.

$$N_s = N_b. \quad (3)$$

В первом случае, при треугольной эпюре напряжений, это уравнение будет иметь вид:

$$\xi^2 + 2\xi h\mu - 2h\mu = 0. \quad (4)$$

Во втором случае, при прямоугольной эпюре напряжений в бетоне сжатой зоны, получаем:

$$\xi^2 + \xi h\mu - h\mu = 0, \quad (5)$$

где $h = E_s / E_b$, $\mu = A_s / bh_0$.

Если принять $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, $E_b = 2 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 1\%$, то в первом случае $\xi = 0,35$, во втором $\xi = 0,27$. Очевидно, что при $\xi = 0,15$ будет обеспечен запас прочности.

В современных нормативных документах (свод правил СП 63.13330.2012) предлагается расчет железобетонных элементов по прочности наклонных сечений производить: «по наклонному сечению на действие поперечной силы; по наклонному сечению на действие изгибающего момента; по полосе между наклонными сечениями на действие поперечной силы» [2].

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечной силы выполняется из условия

$$Q \leq Q_b + Q_{sw}, \quad (6)$$

где Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении.

Предлагается поперечную силу Q_b определять по формуле

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c}, \quad (7)$$

где φ_{b2} – коэффициент, принимаемый равным 1,5.

В работе [3] представлена расчетная модель (рис. 2), на основании которой получена формула аналогичного вида:

$$Q_b = \frac{N}{\cos \alpha} = \frac{\sigma b h}{\sin \alpha \cos \alpha} = \left(1 + \frac{c^2}{h^2}\right) \frac{R_{bt} b h^2}{c}. \quad (8)$$

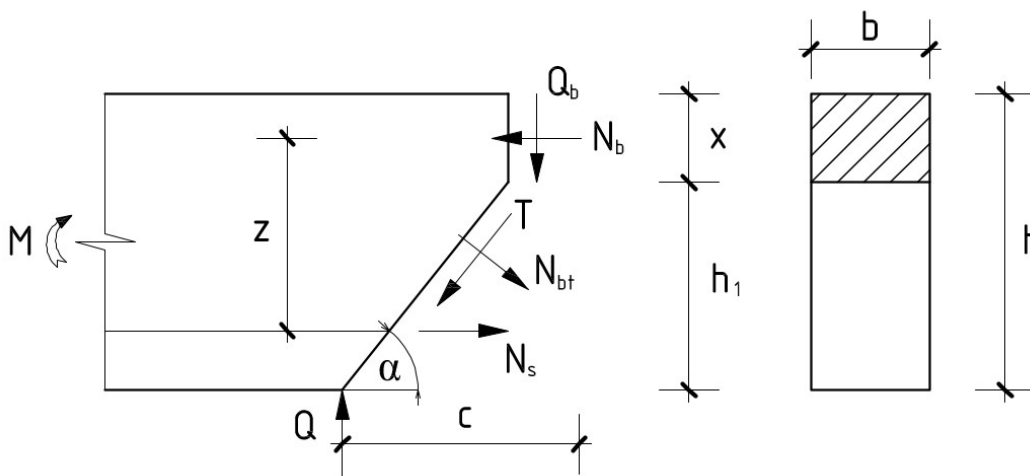


Рис. 2. Расчетная модель изгибаемого ЖБЭ

Формула (8) получена путем проектирования всех сил, действующих в сечении на вертикальную ось. При этом принято, что касательные усилия T равны нулю, а в растянутой зоне действуют напряжения, равномерно распределенные по сечению и равные $\sigma = R_{bt}$ предельным значениям. Коэффициент $\varphi_{b2} = \left(1 + \frac{c^2}{h^2}\right)$ зависит от длины трещины l , угла наклона α трещины и высоты сжатой зоны x ; $l^2 = c^2 + h^2$; $h_1 = (1 - \xi)h$.

Однако рекомендуемая нормами формула (7), как и формулы (2), (8), являются некорректными, так как не отвечают принципу соответствия. При $\mu = 0$, $c = 0$ получаем $Q_b = \infty$, а должно быть $Q_b = R_{bt}bh$.

Из курса сопротивления материалов известно, что в поперечном сечении изгибаемого элемента действуют нормальные σ и касательные τ напряжения, распределение и величина которых зависят от вида приложенной нагрузки и армирования железобетонного элемента. В каждой точке изгибаемого элемента возникают попарно равные касательные напряжения, действующие в плоскости, параллельной нейтральному слою (скальвающие), и в плоскости поперечного сечения (перерезывающие), которые можно вычислить по формуле

$$\tau = \frac{Qs}{bI}, \quad (9)$$

где Q – поперечная сила; I – момент инерции приведенной площади сечения (относительно нейтральной оси); s – статический момент.

Первые предложения по расчету прочности наклонных сечений ЖБЭ были опубликованы Моршем (Emil Morsch, *Der Eisenbetonbau: Seine Theorie und Anwendung*, 1922 г.) [4].

Экспериментально установлено [2,5], что в процессе разрушения изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям можно выделить две основные схемы. Первая схема характеризуется тем, что в процессе нагружения прежде всего достигают предельных значений главные напряжения в бетоне у вершины зарождающейся наклонной трещины. Касательные напряжения изменяются по высоте согласно закону параболы. На поверхности балки $\tau = 0$, а на нейтральной оси $\tau = \tau_{\max}$. Если в растянутой зоне балки имеется продольная арматура, то эпюру касательных напряжений можно условно принять в виде трапеции (рис. 3).

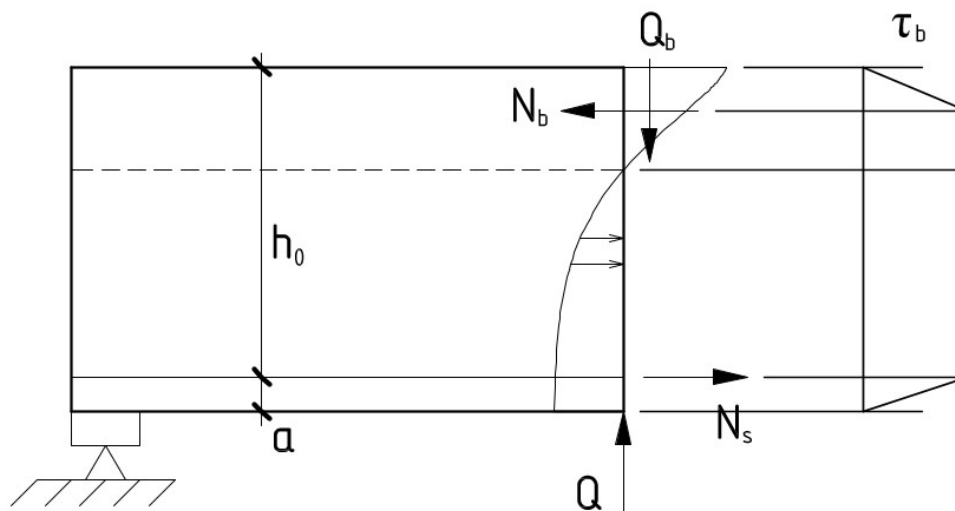


Рис. 3. Расчетная схема наклонного сечения (случай 1)

Если же бетон на растяжение не работает (вторая схема), то при развитии наклонной трещины прежде всего достигают предельных значений главные напряжения в бетоне у вершины наклонной трещины. Эпюра нормальных напряжений в бетоне над наклонной трещиной имеет криволинейный характер, но для расчетной схемы предложено [2] принимать ее прямоугольной. Напряжения разрушения предложено принять равными R_{np} (рис. 4).

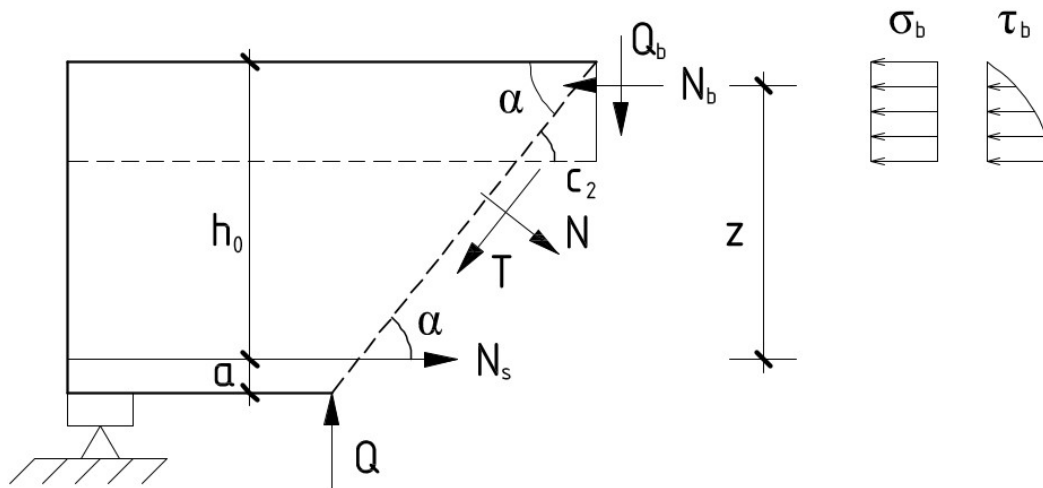


Рис. 4. Расчетная схема наклонного сечения (случай 2)

Помимо обычных рассматриваемых сил в бетоне и арматуре в наклонном сечении действуют силы зацепления [2]. Наклонные трещины имеют ломаную конфигурацию, а бетон в трещине – шероховатую поверхность. Поэтому при относительном смещении соответствующих точек берегов наклонной трещины возникают «силы зацепления». В классической механике эти силы ассоциируются с силами механического трения или силами внутреннего трения, которые в теории прочности Кулона–Навье определяются по формуле $\gamma\sigma$, где γ – коэффициент трения; σ – нормальные напряжения. Условие прочности Кулона–Навье имеет вид:

$$[\tau] = R_{bt} \pm \gamma\sigma, \quad (10)$$

где τ – касательные напряжения; R_{bt} – прочность на сдвиг.

Рассмотрим возможность применения условия прочности Кулона–Навье для построения теории расчета прочности наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов.

Рассмотрим первый случай. В железобетонной балке с постоянной шириной и высотой поперечного сечения касательные напряжения изменяются по высоте сечения согласно закону параболы: на поверхности балки $\tau = 0$, а на нейтральной оси $\tau = \tau_{max}$.

При армировании растянутой зоны балки на первой стадии НДС бетон работает как в сжатой, так и в растянутой зоне. В этом случае распределение касательных напряжений по высоте поперечного сечения балки можно представить в виде трапециевидной эпюры.

Под действием нормальных и касательных напряжений в слоях бетона, прилегающих к нейтральной оси, возможно появление первых наклонных трещин. Поэтому предлагаем ввести в практику проектирования ЖБК расчет наклонных сечений по образованию трещины.

Расчетное условие записать в виде неравенства:

$$Q \leq Q_{bcrc}, \quad (11)$$

где Q_{bcrc} – поперечная сила, воспринимаемая бетоном в момент образования наклонной трещины.

Для определения Q_{bcrc} предлагается рассмотреть расчетную схему (см. рис. 3) и условие прочности Кулона–Навье:

$$[\tau] = R_{b\tau} - \gamma\sigma. \quad (12)$$

Нормальные напряжения со знаком минус, так как их рост снижает прочность бетона на срез.

Из анализа расчетной схемы (3) и условий прочности (12) получаем:

$$Q_{bcrc} = \left(1 + \frac{c^2}{h^2}\right) \frac{R_{b\tau}bh}{1 + \gamma \frac{c}{h}}. \quad (13)$$

Второй случай – разрушение изгибаемого элемента по наклонному сечению. Под действием нагрузки в железобетонном изгибаемом элементе образовалась наклонная трещина. Бетон в растянутой зоне не работает. Расчетная схема представлена на рис. 4.

Условия прочности Кулона–Навье для сжатой зоны бетона запишем в виде неравенства:

$$[\tau] = R_{b\tau} + \gamma\sigma. \quad (14)$$

Из анализа расчетной схемы (4), с учетом условия прочности (14), получаем:

$$Q_b = \left(1 + \frac{c^2}{h^2}\right) \frac{R_{b\tau}bh}{\left(1 - \gamma \frac{c}{h}\right)} \xi. \quad (15)$$

Сравнение выражений Q_{bcrc} и Q_b показывает, что поперечная сила, воспринимаемая бетоном, будет возрастать по мере роста процента армирования μ , так как

$$\frac{Q_b}{Q_{bcrc}} = \xi \frac{1 + \gamma \frac{c}{h}}{1 - \gamma \frac{c}{h}}, \quad (16)$$

где ξ – определяется по формуле (5) и зависит от μ .

Проверяем принципы соответствия:

$$\text{если } c = 0, \text{ то } Q_{bcrc} = R_{b\tau}bh; Q_b = R_{b\tau}bh\xi; \quad (17)$$

$$\text{если } c = h, \text{ то } Q_{bcrc} = 2 \frac{R_{b\tau}bh}{1 + \gamma}; Q_b = 2 R_{b\tau}bh \frac{\xi}{1 - \gamma}. \quad (18)$$

В ы ы ы ы . Аналитически получены выражения, позволяющие определить поперечную силу, воспринимаемую бетоном на разных стадиях разрушения по наклонным сечениям. Полученные выражения не противоречат принятой методике расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов и отвечают принципу соответствия Н. Бора.

Список литературы

1. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
2. Гвоздев, А.А. Новое о прочности железобетона / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, С.М. Крылов [и др.]; под ред. К.В. Михайлова. – М.: Стройиздат, 1977. – 272 с.
3. Селяев, В.П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов / В.П. Селяев, П.В. Селяев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 220 с.

4. Астафьев, А.Ф. Справочная книга по бетону и железобетону / А.Ф. Астафьев. – 8-е изд. – Л.: Академическое издательство, 1929. – 638 с.
5. Залесов, А.С. Несущая способность железобетонных элементов при действии поперечных сил / А.С. Залесов, О.Ф. Ильин // Бетон и железобетон. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 1973. – № 6. – С. 19–21.

References

1. Berg, O.Ya. High-strength concrete / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov, G.N. Pisanko. – M.: Stroyizdat, 1971. – 208 p.
2. Gvozdev, A.A. New information on the strength of reinforced concrete / A.A. Gvozdev, S.A. Dmitriev, S.M. Krylov [et al.]; ed. by K.V. Mikhailov. – M.: Stroyizdat, 1977. – 272 p.
3. Selyaev, V.P. Physicochemical principles of fracture mechanics of cement composites / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev. – Saransk: Publishing house of the Mordov. University, 2018. – 220 p.
4. Astafiev, A.F. Reference book on concrete and reinforced concrete / A.F. Astafiev. – 8th ed. – L.: Academic Publishing House, 1929. – 638 p.
5. Zalesov, A.S. Bearing capacity of reinforced concrete elements under the action of transverse forces / A.S. Zalesov, O.F. Ilyin // Concrete and reinforced concrete. Monthly scientific, technical and production journal. – 1973. – No. 6. – P. 19–21.

УДК 624.04

DOI 10.54734/20722958_2024_4_104

*Тюменский индустриальный университет**Industrial University of Tyumen Architecture and Construction*

Россия, 625000, г. Тюмень,
ул. Володарского, д.38,
тел.: 8 (3452) 28-36-70;
факс: 8(3452) 28-36-60

Russia, 625000, Tyumen, 38, Volodarsky St.,
tel.: 8 (3452) 28-36-70;
fax: 8(3452) 28-36-60

Овчинников Игорь Георгиевич,
доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: bridgesar@mail.ru

Разов Игорь Олегович,
кандидат технических наук, доцент базовой
кафедры «АО Мостострой-11»

Razov Igor Olegovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
basic department "AO Mostostroy-11"

Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России, по проекту «Новые материалы и технологии возведения зданий, сооружений и их элементов с применением роботизированных аддитивных систем» (№ FEWN-2003-0004).

БИОНИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОСТОСТРОЕНИИ

И.Г. Овчинников, И.О. Разов

Рассматривается проблема применения бионического дизайна для создания мостовых сооружений. Под бионическим дизайном понимается симбиоз компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий, основанный на использовании бионического подхода и позволяющий получать эффективные инженерные решения, по форме и структуре напоминающие объекты, встречающиеся в природе. Аддитивные технологии позволят создавать конструкции, похожие на природные объекты, со сложной геометрией и топологией, но за время, гораздо меньшее, чем потребовалось природе для создания своих объектов. Представлены особенности применения бионического подхода (биомимикрии) для создания мостовых сооружений, рассмотрены два алгоритма заимствования из живой природы при создании новых инженерных объектов. Приведены примеры мостовых сооружений, созданных на основе биомимикрии с использованием макроуровневого и микроуровневого подходов. Отмечены особенности применения бионического дизайна при решении инженерных задач с использованием парадигмы «моделирование и оптимизация», позволяющей путем применения наукоемкого компьютерного моделирования и оптимизации достаточно быстро создавать объекты нового поколения повышенного качества. Указаны возможности использования фрактальных структур для создания эффективных конструкций. В заключение рассмотрены перспективы аддитивных технологий для создания мостовых конструкций и затронуты проблемы, возникающие при их применении.

Ключевые слова: бионический дизайн, аддитивные технологии, 3D-печать, мостостроение, биомиметика, биомимикрия, топологическая оптимизация, фрактальные структуры, компьютерный инжиниринг

BIONIC DESIGN AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN BRIDGE ENGINEERING

I.G. Ovchinnikov, I.O. Razov

The problem of using bionic design to create bridge structures is considered. Bionic design is understood as a symbiosis of computer engineering and additive technologies, based on the use of a bionic approach and allowing to obtain effective engineering solutions that are similar in shape and structure to objects found in nature. Additive technologies will make it possible to create structures similar to natural objects, with complex geometry and topology, but in much less time than in nature.

The peculiarities of the use of bionic approach (biomimicry) for creating bridge structures is considered, two algorithms borrowed from living nature when creating new engineering objects are considered. Examples of bridge structures created on the basis of biomimicry using macro-level and micro-level approaches are given. The features of the use of bionic design in solving engineering problems are considered using the “modeling and optimization” paradigm, which allows, through the use of knowledge-intensive computer modeling and optimization, to create objects of a new generation with improved quality quickly. The possibilities of using fractal structures to create effective structures are indicated. In conclusion, the possibilities and problems of using additive technologies for products bridge structures are considered.

Keywords: bionic design, additive technologies, 3D-printing, bridge engineering, biomimetics, biomimicry, topological optimization, fractal structures, computer engineering

Введение

Под бионическим дизайном понимается симбиоз компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий, основанный на использовании бионического подхода и позволяющий получать эффективные инженерные решения, по форме и структуре напоминающие объекты, встречающиеся в природе. В данной статье мы будем рассматривать применение бионического дизайна для создания транспортных сооружений различного вида (пешеходных, балочных, вантовых, висячих, арочных мостов, путепроводов, виадуков и их конструктивных элементов). При этом аддитивные технологии позволят создавать конструкции, похожие на природные объекты, со сложной геометрией и топологией, но за время, гораздо меньшее, чем потребовалось природе для создания своих объектов. Применение аддитивных технологий позволит также создавать повторяемые проекты по размеру, форме, распределению материала, то есть в определенной мере обеспечивать прототипирование с меньшим весом конструкций при обеспечении более высоких механических характеристик.

Бионический подход к созданию мостовых сооружений

Бионический подход приводит к сокращению разрыва между миром строительных конструкций и природой. И хотя известны примеры, показывающие, что ряд решений строительных систем был разработан с использованием биологических прототипов (например, вантовые мосты, Эйфелева башня и т.д.), но пока еще отсутствует алгоритмированная процедура определения того, образ какого представителя живой природы является наиболее подходящим для создания искусственного строительного объекта. А значит, возникает необходимость разработать методологию алгоритмизации (формализации) этой процедуры.

В России, да и в остальном мире, несмотря на наличие ряда отечественных [1–5] и зарубежных [6–18] публикаций проблема применения бионического подхода мало разработана, а его результаты не всегда оказываются экономически эффективными. Следует отметить, что бионический подход к созданию объектов иногда называют биомиметикой или биомимикрией (причем оба термина переводятся с греческого одинаково: *жизнь и подражание*). При этом под биомиметикой понимается создание объектов, основные части которых заимствуются из природы [19]. В случае же биомимикрии [20] делается упор на использовании принципов устойчивого развития (Sustainable design [21]), обеспечивающих сохранение природных ресурсов и минимизацию отрицательного воздействия процессов создания и эксплуатации объектов на окружающую среду. В [20] сформулированы такие принципы биомимикрии: форма объекта определяется его функциями; используется только та энергия, которая необходима; основой всего является многообразие; перерабатывается все, что возможно; взаимодействие поощряется; максимально используются ограниченные возможности; все создаваемое природой ориентируется на условия конкретной местности.

Следуя [22], можно отметить два алгоритма заимствования из живой природы при создании новых объектов: снизу вверх и сверху вниз (табл. 1).

Алгоритмы заимствования из живой природы для решения инженерных проблем

Снизу вверх		Сверху вниз	
Исходные данные	Фундаментальные биологические исследования	Исходные данные	Инженерная проблема
Исследования	Анализ биологических аналогов	Поиск аналогов	Нахождение биологических аналогов
Формулирование биологических принципов	Нахождение биологических принципов в биологических аналогах	Подбор биологических принципов для инженерной реализации	Анализ и систематизация подобранных биологических принципов
Обобщение	Преобразование биологических принципов в форму, пригодную для решения инженерной проблемы		Преобразование биологических принципов в форму, пригодную для решения инженерной проблемы
Решение инженерной проблемы	Применение биологических принципов для решения инженерной проблемы	Решение инженерной проблемы	Применение биологических принципов для решения инженерной проблемы

Рассмотрим некоторые примеры мостовых сооружений, реализованных на основе биомимикрии.

Рис. 1 [5] иллюстрирует применение бионического подхода к созданию моста Хендерсона (рис. 1,a) и моста, использующего структуру молекулы ДНК (рис. 1,b) в Сингапуре. К сожалению, использование геометрической формы природных объектов в качестве основы сделало эти мосты несколько неуклюжими и довольно сложными и экономически неэффективными. При создании пешеходной развязки в Китае (рис. 1,c) за основу взята форма цветка, но проект также оказался неэффективным по сравнению с обычными инженерными решениями. Наконец, «мост Мира» знаменитого Сантьяго Калатравы в Калгари (рис. 1,d), конструкция которого похожа на «конструкцию» дождевого червя, считается не совсем современным для центра Калгари. Заметим также, что при реализации этого проекта Калатрава сорвал сроки его реализации и значительно превысил смету.

Следует заметить, что подход к проектированию мостовых сооружений на основе биомимикрии реализуется или на макро-, или на микроуровне.

При использовании макроуровневого подхода внешний вид природных объектов используется для проектирования мостовых сооружений в целом или же для проектирования элементов мостов (фундаментов, опор, пролетных строений). То есть на макроуровне применяется информация о внешней форме биологических объектов (растений, животных, насекомых, рыб, микробов, человека), текстуре поверхностей, характеристиках механических структур, свойствах биологических материалов и так далее.

Примером макроуровневого подхода является мост Мира (см. рис. 1,d) или же мост Питон в Амстердаме (рис. 2).



Рис. 1. Примеры применения бионического подхода в мостостроении за рубежом
(источник: <http://photo-bonus.ru/?p=12062>)

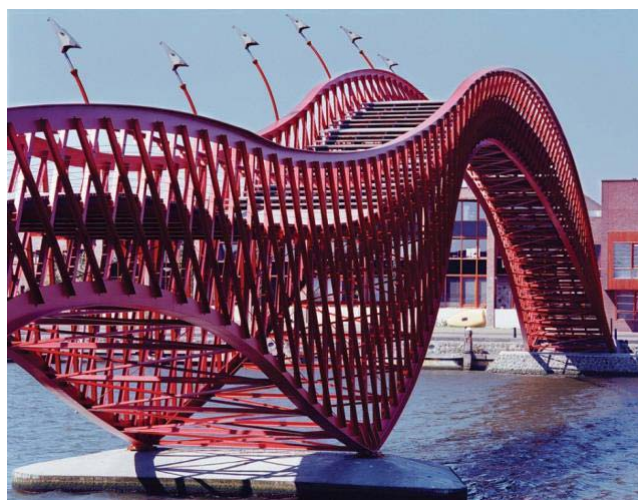


Рис. 2. Красный мост-питон
(источник: http://www.bridgesall.ru/blog/most_piton_pythonbrug)

При использовании микроуровневого подхода источником новых идей для конструирования или оптимизации устройства мостов является информация о внутренней структуре и особенностях функционирования живых созданий, то есть о внутреннем строении биологических организмов, о процессах преобразования энергии в организмах, включая механизм нейронных реакций, передачу и обработку информации, возможность регулирования поведения, а также способность адаптироваться в окружающей среде. Примером микроуровневого подхода является пешеходный мост Helix Bridge в Сингапуре, напоминающий спираль ДНК (см. рис. 1, b).

Особенности применения бионического дизайна при решении инженерных задач

Перед проектировщиками инженерных сооружений обычно стоит задача создания конструкции, оптимальной с точки зрения соответствия ряду нередко конфликтующих критериев, таких, как форма, размеры, вес, прочность, жесткость, устойчивость, грузоподъемность, долговечность, стоимость изготовления, монтажа и эксплуатации. Причем желательно такие оптимальные конструкции получить за время, значительно меньшее, чем потребовалось природе для создания своих оптимальных конструкций.

Понятно, что такую сложную задачу можно решить только за счет сочетания компьютерных методов многопараметрической топологической многодисциплинарной оптимизации в сочетании с эффективными аддитивными технологиями.

Цель решения задачи оптимизации конструкции – это нахождение оптимального распределения материала в пространстве, которое занимает конструкция, с учетом внешних воздействий и условий опирания, а также сопряжения с другими элементами конструкции. При этом найденное решение должно удовлетворять требованиям прочности, жесткости, устойчивости, долговечности и наименьшего веса. Согласно [23] имеется три типа топологической оптимизации: оптимизация размеров (рис. 3,а), оптимизация формы (рис.3,б), оптимизация топографии (рис.3,с).

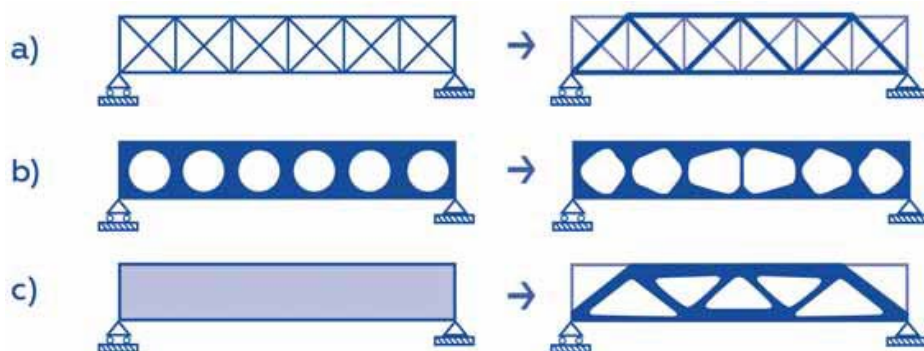


Рис. 3. Три типа топологической оптимизации [23]

Оптимизация размеров происходит путем варьирования толщины стенок элементов, толщины слоев, площади поперечного сечения и т.д. Оптимизация формы реализуется путем изменения внутренних и внешних границ, контуров многосвязных тел, отверстий и др. Топографическая оптимизация применима к двумерным объектам, толщина которых на порядок меньше характерных поперечных размеров (пластины, оболочки), и обычно сводится к местным утолщениям несущей поверхности.

В настоящее время компьютерные технологии оптимизации обычно включаются в процесс проектирования и применяются уже на этапе разработки концептуального проекта, что позволяет избежать полуинтуитивных методик, основанных на модернизации уже существующих конструктивных решений. При этом начинает достаточно широко применяться парадигма «моделирование и оптимизация» [24], позволяющая путем применения наукоемкого компьютерного моделирования и оптимизации достаточно быстро создавать объекты нового поколения повышенного качества.

Однако здесь возникает проблема, состоящая в том, что получающиеся в результате применения вышеуказанной парадигмы конструкции имеют весьма сложную геометрическую форму, которую конструктор не в состоянии получить, опираясь только на свой опыт и интуицию. Поэтому если проектировщики, используя современные компьютерные технологии, и получали проекты оптимальных, но весьма сложных конструкций, то современные технологии не позволяли эти конструкции изготовить.

Положение спасает применение аддитивных технологий. То есть объединение современных компьютерных технологий и аддитивного производства, представляющее собой бионический дизайн, и позволяет решать поставленную инженерную задачу по созданию весьма сложных, но оптимальных конструкций.

В мостовых конструкциях широко используются балки в качестве элементов пролетных строений и колонны в виде опор. Причем балки пролетных строений нередко выполняются из стали или алюминиевых сплавов, имеющих высокие прочностные показатели. Но при проектировании этих конструкций необходимо выполнять расчет на действующие нагрузки.

Исследователь Йонг Мао с сотрудниками из университета Ноттингема предложил новую технологию создания балочных конструкций с использованием фрактальных структур, которые выполняются по технологии 3D-печати [25]. Авторы этой технологии полагают, что балочные конструкции, изготовленные по аддитивной технологии (рис. 4), имеют весьма малый вес, но очень высокую прочность, причем, как утверждают разработчики, при весьма высокой жесткости прочность таких балок в тысячи раз превышает прочность балок, созданных по обычной технологии.

Причем жесткость получаемых конструкций можно настраивать под вид прикладываемой нагрузки, при этом сокращаются и объемы отходов производства, и затраты на создание конструкции. Правда, стоит заметить, что процесс производства особых фрактальных структур, необходимых для изготовления таких балок, отличается значительной сложностью, хотя и имитирует природные механизмы их создания.

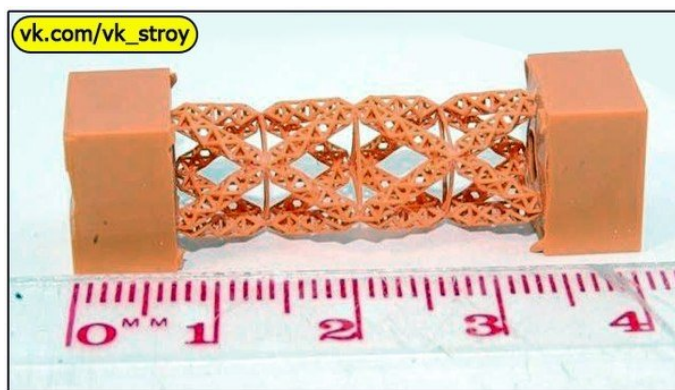


Рис. 4. Образец балочной конструкции, созданной с использованием фрактальных структур [25]

Имитируя те механизмы формирования фрактальных структур, которые происходят в живой природе, специалистам удалось разработать целый ряд работающих теоретических основ, которые можно использовать в том числе и для строительных конструкций. Речь, в частности, идет о тех конструкциях, в рамках которых их иерархический порядок в структуре находится в прямой зависимости от видов, а также от степени воздействий и нагрузки на них.

Здесь, как уже отмечалось, используется симбиоз компьютерных технологий и аддитивного производства, в процессе которого создаваемая структура подстраивается под действующую нагрузку. К сожалению, как показали результаты проведенного анализа, на прочность этих фрактальных структур большое влияние оказывают возможные возникающие при изготовлении дефекты, и потому весьма важная задача – повысить живучесть, то есть сопротивляемость конструкций таким дефектам.

Далее применительно к конструкциям, подвергающимся сжимающим нагрузкам, при использовании указанной технологии исходная привычная конструкция (рис. 5,а) заменяется фрактальной структурой, приведенной на рис. 5,б.

Получается, что бионический дизайн позволяет адаптировать создаваемые конструкции под конкретные нагрузки, причем фрактальные несущие конструкции в состоянии выдерживать ту же нагрузку, что и обычные конструкции, но при значительно меньшем расходе материала.

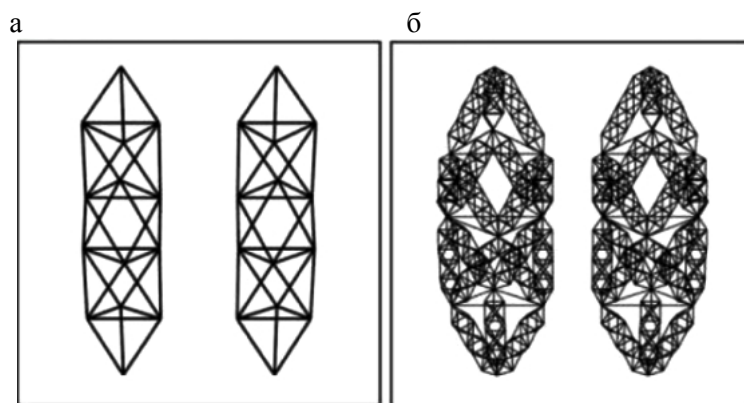


Рис. 5. Исходная (а) и фрактальная (б) структуры, работающие на сжатие [25]

Применение аддитивных технологий при создании мостовых конструкций

Аддитивные технологии начали применяться в транспортном строительстве сравнительно недавно. Первый пешеходный мост с использованием 3D-печати был создан в 2016 году в Испании (рис. 6), причем его проектировали так, чтобы он «сливался» с природой [2], а материал был бы использован максимально рационально, подчеркивая эффективность аддитивной технологии.

Как уже отмечалось выше, традиционные технологии ориентированы на получение несложных форм. Однако ведь именно сложные формы обеспечивают наиболее эффективное использование материала, и существующие программные комплексы, основанные на нейросетях, перебирая и просчитывая большое количество вариантов, находят самую эффективную с точки зрения расхода материала форму, причем эта форма может быть весьма необычной.



Рис. 6. Пешеходный мост, напечатанный на 3D-принтере

(источник: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-first-3dprinted-bridge-was-built-in-spain>)

В лаборатории перспективных технологий Joris LAARMAN Lab (Амстердам, Голландия) на базе промышленного робота создан 3D-принтер, создающий сложные и самоподдерживающиеся конструкции из различных металлов и сплавов. Для печати конструкций используется роботизированная рука с 6 степенями свободы, которая фактически управляет аппаратом, комбинирующим сварку и непрерывную подачу металла. С помощью различных режимов и технологий электродуговой сварки получается конструкция, составленная из мелких расплавленных капель металла, т.е. это сварка без свариваемых поверхностей – сплошной сварной шов (рис. 7).



Рис. 7. Создание сварочной самоподдерживающей конструкции
(источник: http://www.dp.ru/a/2015/06/18/V_Gollandii_3D-printeri_p/gallery/24406/182269/)

В Амстердаме был создан восьмиметровый пешеходный мост, построенный прямо в воздухе методом 3D-печати, причем роботы, обладающие шестью степенями подвижности, двигаясь навстречу друг другу с противоположных берегов, пошагово напечатали сложную структуру моста (рис. 8).



Рис. 8. Печать сварного моста над речкой
(источник: http://www.dp.ru/a/2015/06/18/V_Gollandii_3D-printeri_p/gallery/24406/182257/)

Правда, с нашей точки зрения возникает один вопрос: обычно мы полагали, что сварные узлы – это самые опасные узлы с точки зрения возможных повреждений. И как быть, если весь мост представляет собой сплошной сварной шов?

Еще одно возможное применение аддитивных технологий в транспортном строительстве – макетирование, когда сделав уменьшенную копию проектируемой конструкции, можно оценить ее дизайн, а также провести испытания модели реальной конструкции для получения информации о поведении реального прототипа.

В транспортном строительстве также можно использовать макеты мостов, эстакад, полученные с использованием 3D-печати. Причем такие примеры уже были в России. В РФ при создании Крымского моста проводились аэродинамические испытания [26] с целью определения воздействия ветровых нагрузок на мост (рис. 9).

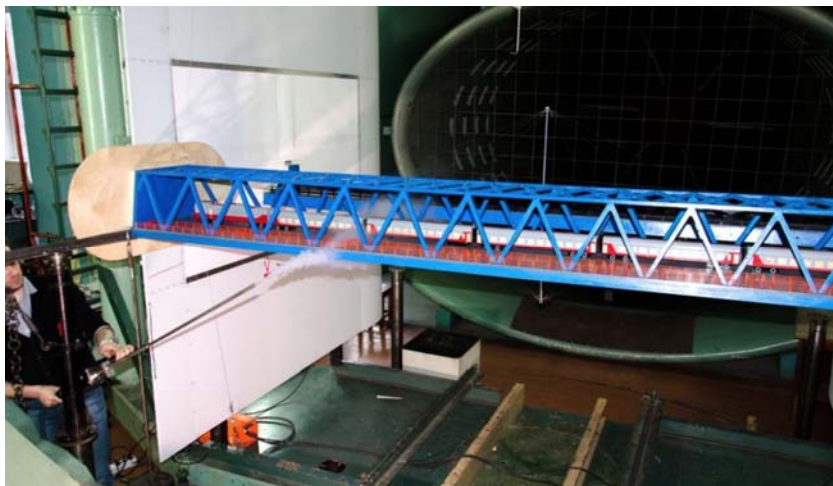


Рис. 9. Аэродинамические испытания модели крымского моста
(источник: <https://назовимост.рф/multimedia/foto/isyataniya-modeli-mosta>)

Заключение

Нами рассмотрена проблема применения бионического дизайна для создания мостовых сооружений. Под бионическим дизайном понимается симбиоз компьютерного инжиниринга и аддитивных технологий, основанный на использовании бионического подхода и позволяющий получать эффективные инженерные решения, по форме и структуре напоминающие объекты, встречающиеся в природе. Аддитивные технологии позволяют создавать конструкции, похожие на природные объекты, со сложной геометрией и топологией, но за время, гораздо меньшее, чем потребовалось природе для создания своих объектов. Рассмотрено применение бионического подхода (биомимикрии) для создания мостовых сооружений, рассмотрены два алгоритма заимствования из живой природы при создании новых инженерных объектов. Приведены примеры мостовых сооружений, созданных на основе биомимикрии с использованием макроуровневого и микроуровневого подходов. Рассмотрены особенности применения бионического дизайна при решении инженерных задач с использованием парадигмы «моделирование и оптимизация», позволяющей путем применения наукоемкого компьютерного моделирования и оптимизации достаточно быстро создавать объекты нового поколения повышенного качества. Указаны возможности использования фрактальных структур для создания эффективных конструкций. В завершение рассмотрены возможности и возникающие проблемы при применении аддитивных технологий для создания мостовых конструкций.

Список литературы

1. Темнов, В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике / В.Г. Темнов. – Л.: Стройиздат, 1987. – 256 с.
2. Ковырягин, М.А. Управляемые конструкции (в мостостроении) / М.А. Ковырягин, И.Г. Овчинников. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2003. – 95 с.
3. Овчинников, И.Г. Применение бионического подхода к проектированию пешеходных мостов / И.Г. Овчинников, А.Б. Караханян // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции. Изд-во ПНИПУ, г. Пермь, 23–24 апреля 2015 г. – Пермь, 2015. – С. 430–436.
4. Овчинников, И.Г. Пешеходные мосты современности: тенденции проектирования. Часть 1. Использование бионического подхода / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, А.Б. Караханян // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, №2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. – DOI: 10.15862/81TVN215.

5. Современные пешеходные и велосипедные мосты (основные концепции проектирования и примеры): моногр. / И.И. Овчинников, А.Б. Караханян, И.Г. Овчинников, Ю.П. Скачков. – Пенза: ПГУАС, 2018. – 140 с.
6. Aldersey-Williams, H. Towards biomimetic architecture / H. Aldersey-Williams // *Nat Mater.* – 2004. – 3(5). – P. 277–279.
7. Bonser, R.H.C. Patented biologically-inspired technological innovations a twenty-year view / R.H.C. Bonser // *Journal of Bionic Engineering.* – 2006. – №3. – P. 39–41.
8. Vincent, J.F.V. Biomimetics: Its practice and theory / J.F.V. Vincent, O.A. Bogatyreva, N.R. Bogatyrev, A. Bowyer, A.K. Pahl // *Journal of the Royal Society Interface.* – 2006. – 3. – P. 471–482.
9. Mak, T.W. Using descriptions of biological phenomena for idea generation / T.W. Mak, L.H. Shu // *Res Eng Des.* – 2008. – 19(1). – P. 21–28.
10. Bhushan, B. Biomimetics: lessons from nature—an overview / B. Bhushan // *Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci.* – 2009. – 367(1893). – P. 1445–1486.
11. Helms, M. Biologically inspired design: process and products / M. Helms, S.S. Vattam, A.K. Goel // *Des. Stud.* – 2009. – 30(5). – P. 606–622.
12. Liu, K. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration / K. Liu, L. Jiang // *Nano Today.* – 2011. – 6(2). – P. 155–175.
13. Santulli, C. Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience / C. Santulli, C. Langella // *Int. J Technol. des Educ.* – 2011. – 21(4). – P. 471–485.
14. Shu, L.H. Biologically inspired design / L.H. Shu, K. Ueda, I. Chiu, H. Cheong // *CIRP Ann Manuf. Technol.* – 2011. – 60(2). – P. 673–693.
15. Chen, P-Y. Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs / P-Y. Chen, J. McKittrick, M. Meyers // *Prog. Mater. Sci.* – 2012. – 57. – P. 1492–1704.
16. Knippers, J. Design and construction principles in nature and architecture / J. Knippers, T. Speck // *Bioinspir Biomim.* – 2012. – №7. – P. 1–10.
17. Bar-Cohen, Y. Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies / Y. Bar-Cohen // *Int. J Aeronaut Space Sci.* – 2012. – 13(1). – P. 1–13.
18. Maglic, Michael J. «Biomimicry: Using Nature as a Model for Design». Masters Theses 1896 – February 2014, Paper 871.
19. Biomimetics: Advancing nanobiomaterials and tissue engineering / ed. by M. Ramalingam, Wang Xiumei, Chen Guoping, P. Ma, Cui Fu-Zhai. – Beverley (Mass.): Scrivener Publishing, 2013. – 384 p.
20. Benyus, J. Biomimicry: Innovation inspired by nature / J. Benyus. – New York: William Morrow & Co., 1997. – 308 p.
21. Ovchinnikov, I.G. Sustainable bridge design in Russia / I.G. Ovchinnikov, I.I. Ovchinnikov // *Railway Transport and Technologies: International Scientific and Practical Conference. AIP Conf. Proc. 2624, 030021-1–030021-8; <https://doi.org/10.1063/5.0133764> Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4706-6/\$30.00 p. 030021-1 – 030021-8 (8 p).*
22. Freitas Salgueiredo, C. Modeling biological inspiration for innovative design / C. Freitas Salgueiredo. – URL: https://i3.cnrs.fr/wp-content/uploads/2016/05/Freitas_conferenceI32013.pdf
23. Olason, Anton Methodology for Topology and Shape optimization in the Design Process / Anton Olason, Daniel Tidman. // Master's Thesis in Solid and Fluid Mechanics. Department of Applied Mechanics Division of Dynamics Chalmers University of Technology SE-412 96 Göteborg Sweden. – 64 p.
24. Компьютерный инжиниринг / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
25. Rayneau-Kirkhope, Daniel. Hierarchical space frames for high mechanical efficiency: Fabrication and mechanical testing / Daniel Rayneau-Kirkhope, Yong Maoa, Robert Farr, Joel Segal // *Mechanics Research Communications.* – 2012. – 46. – P.41–46. – URL: <https://lms.ac.uk/documents/paper-hierarchical-space-frames-for-high-mechanical-efficiency-fabrication-and-mechanical-testing.pdf>

26. Исследования Крымского моста в ландшафтной аэродинамической трубе. – URL: http://krylov-centre.ru/press/video/1270/?sphrase_id=39665. – Дата обращения: 26.03.2021.

References

1. Temnov, V.G. Structural systems in nature and construction technology / V.G. Temnov. – L.: Stroyizdat, 1987. – 256 p.
2. Kovyryagin, M.A. Controllable structures (in bridge construction) / M.A. Kovyryagin, I.G. Ovchinnikov. – Saratov: Publishing house of SSTU, 2003. – 95 p.
3. Ovchinnikov, I.G. Application of the bionic approach to the design of pedestrian bridges / I.G. Ovchinnikov, A.B. Karakhanyan // Modernization and scientific research in the transport complex: Materials of the international scientific and practical conference. PNIPU Publishing House, Perm, April 23–24, 2015. – Perm, 2015. – P. 430–436.
4. Ovchinnikov, I.G. Pedestrian bridges of our time: design trends. Part 1. Using the bionic approach / I.G. Ovchinnikov, I.I. Ovchinnikov, A.B. Karakhanyan // Internet journal “SCIENCE”. – 2015. – Vol. 7, No. 2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN215.pdf> (free access). Cap. from the screen. Language Russian, English DOI: 10.15862/81TVN215.
5. Modern pedestrian and bicycle bridges (basic design concepts and examples): monograph. / I.I. Ovchinnikov, A.B. Karakhanyan, I.G. Ovchinnikov, Yu.P. Skachkov. – Penza: PGUAS, 2018. – 140 p.
6. Aldersey-Williams, H. Towards biomimetic architecture / H. Aldersey-Williams // Nat Mater. – 2004. – 3(5). – P. 277–279.
7. Bonser, R.H.C. Patented biologically-inspired technological innovations a twenty-year view / R.H.C. Bonser // Journal of Bionic Engineering. – 2006. – №3. – P. 39–41.
8. Vincent, J.F.V. Biomimetics: Its practice and theory / J.F.V. Vincent, O.A. Bogatyreva, N.R. Bogatyrev, A. Bowyer, A.K. Pahl // Journal of the Royal Society Interface. – 2006. – 3. – P. 471–482.
9. Mak, T.W. Using descriptions of biological phenomena for idea generation / T.W. Mak, L.H. Shu // Res Eng Des. – 2008. – 19(1). – P. 21–28.
10. Bhushan, B. Biomimetics: lessons from nature—an overview / B. Bhushan // Philos. Trans Roy Soc. A Math Phys. Eng. Sci. – 2009. – 367(1893). – P. 1445–1486.
11. Helms, M. Biologically inspired design: process and products / M. Helms, S.S. Vattam, A.K. Goel // Des. Stud. – 2009. – 30(5). – P. 606–622.
12. Liu, K. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration / K. Liu, L. Jiang // Nano Today. – 2011. – 6(2). – P. 155–175.
13. Santulli, C. Introducing students to bio-inspiration and biomimetic design: a workshop experience / C. Santulli, C. Langella // Int. J Technol. des Educ. – 2011. – 21(4). – P. 471–485.
14. Shu, L.H. Biologically inspired design / L.H. Shu, K. Ueda, I. Chiu, H. Cheong // CIRP Ann Manuf. Technol. – 2011. – 60(2). – P. 673–693.
15. Chen, P-Y. Biological materials: functional adaptations and bioinspired designs / P-Y. Chen, J. McKittrick, M. Meyers // Prog. Mater. Sci. – 2012. – 57. – P. 1492–1704.
16. Knippers, J. Design and construction principles in nature and architecture / J. Knippers, T. Speck // Bioinspir Biomim. – 2012. – №7. – P. 1–10.
17. Bar-Cohen, Y. Nature as a model for mimicking and inspiration of new technologies / Y. Bar-Cohen // Int. J Aeronaut Space Sci. – 2012. – 13(1). – P. 1–13.
18. Maglic, Michael J. «Biomimicry: Using Nature as a Model for Design». Masters Theses 1896 – February 2014, Paper 871.
19. Biomimetics: Advancing nanobiomaterials and tissue engineering / ed. by M. Ramalingam, Wang Xiumei, Chen Guoping, P. Ma, Cui Fu-Zhai. – Beverley (Mass.): Scrivener Publishing, 2013. – 384 p.
20. Benyus, J. Biomimicry: Innovation inspired by nature / J. Benyus. – New York: William Morrow & Co., 1997. – 308 p.

21. Ovchinnikov, I.G. Sustainable bridge design in Russia / I.G. Ovchinnikov, I.I. Ovchinnikov // *Railway Transport and Technologies: International Scientific and Practical Conference*. AIP Conf. Proc. 2624, 030021-1–030021-8; <https://doi.org/10.1063/5.0133764> Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4706-6/\$30.00 p. 030021-1 – 030021-8 (8 p).
22. Freitas Salgueiredo, C. Modeling biological inspiration for innovative design / C. Freitas Salgueiredo. – URL: https://i3.cnrs.fr/wp-content/uploads/2016/05/Freitas_conferenceI32013.pdf
23. Olason, Anton Methodology for Topology and Shape optimization in the Design Process / Anton Olason, Daniel Tidman. // *Master's Thesis in Solid and Fluid Mechanics*. Department of Applied Mechanics Division of Dynamics Chalmers University of Technology SE-412 96 Göteborg Sweden. – 64 p.
24. Computer engineering / A.I. Borovkov, S.F. Burdakov, O.I. Klyavin, M.P. Melnikova, A.A. Mikhailov, A.S. Nemov, V.A. Palmov, E.N. Silina. – St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. University, 2012. – 93 p.
25. Rayneau-Kirkhope, Daniel. Hierarchical space frames for high mechanical efficiency: Fabrication and mechanical testing / Daniel Rayneau-Kirkhope, Yong Maoa, Robert Farr, Joel Segal // *Mechanics Research Communications*. – 2012. – 46. – P.41–46. – URL: <https://lms.ac.uk/documents/paper-hierarchical-space-frames-for-high-mechanical-efficiency-fabrication-and-mechanical-testing.pdf>
26. Research of the Crimean Bridge in a landscape wind tunnel. – URL: http://krylov-centre.ru/press/video/1270/?sphrase_id=39665. – Date of access: 03/26/2021.

УДК 69

DOI 10.54734/20722958_2024_4_116

Казанский филиал НОА Ассоциация
«Ростехэкспертиза»

Россия, г.Казань, ул. Лейтенанта Шмидта,
34/18

Дымолазов Михаил Анатольевич,
ведущий инженер
E-mail: maikl-d@mail.ru

Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Сабитов Линар Салихзанович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология и организация
строительного производства», советник
РААСН, лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники
E-mail: l.sabitov@bk.ru

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

Kazan branch of the NOA Association
«Rostecexpertiza»

Russia, Kazan, 34/18, Lieutenant Schmidt St.

Dymolazov Mikhail Anatolyevich,
Lead engineer
E-mail: maikl-d@mail.ru

National Research Moscow State University
of Civil Engineering

Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse

Sabitov Linar Salikhzanovich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Technology and Organization of
Construction Production», advisor to RAASN,
laureate of the Russian Government Prize in
the field of science and technology
E-mail: l.sabitov@bk.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

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

РЕШЕТЧАТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ПОНИЖЕННОЙ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ

М.А. Дымолазов, Л.С. Сабитов, И.А.Гарькина

Исследования направлены на снижение веса однослойных структурных покрытий, что и определяет их актуальность. Изучено напряженно-деформированное состояние однослойных структурных покрытий при различных компоновочных решениях, а также определено наиболее рациональное размещение металла в покрытиях. При поиске наиболее рационального расположения элементов использованы вариантный подход и методика рациональной по металлоемкости компоновки в однослойных структурных покрытиях из ограниченного сортамента круглых труб. Отмечено, что при заданных вариантах компоновки и жесткостей элементов можно добиться снижения затрат металла от 17 до 60 %.

Ключевые слова: однослойные структурные покрытия, конструкции, рациональное распределение материала, несущая способность, снижение веса

LATTICE SPATIAL COATINGS OF REDUCED METAL CONTENT

М.А. Dymolazov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina

The research is aimed at reducing the weight of single-layer structural coatings, which determines their relevance. The stress-strain state of single-layer structural coatings is studied with various layout solutions, and the most rational placement of metal in the coatings is determined. A variant approach is used to search for the most rational arrangement of elements and a method for rational metal

content in single-layer structural coatings from a limited range of round pipes. With given layout options and element rigidities, it is possible to reduce metal costs from 17 to 60 %.

Keywords: single-layer structural coatings, structures, rational distribution of material, load-bearing capacity, weight reduction

Рассмотрим различные варианты однослойных структурных покрытий, состоящих из одного слоя сеток из стальных труб (узловые соединения – сварные через полые стальные шары либо короткие стержни из труб с заглушенными торцами; в местах узловых соединений крепятся ограждающие конструкции кровли). В качестве ограждающих конструкций кровли рассматривались кровельные материалы: стеклопакеты и листы из поликарбоната. Наиболее простой компоновкой типов сечений структурных конструкций является компоновка из одного типа сечения. В этом случае после статического расчета подбор сечения производится по наиболее загруженному стержню. Однако при такой компоновке сечений в конструкции происходит значительный перерасход материала. Здесь рациональное размещение материала в структурной конструкции связано с расположением типов сечений стержней так, чтобы в них наиболее полно использовалась их несущая способность; при изменении жесткостей стержней (при подборе сечений после статического расчета) в конструкции получается иное распределение усилий в стержнях (определение жесткостей в покрытии требует отдельного рассмотрения и анализа).

При компоновке типов стержней используется метод, приведенный в [1]; он основан на последовательном перерасчете сечений стержневых элементов на каждом шаге подбора жесткостей по результатам статического расчета с использованием современных расчетных комплексов [2]. На первом шаге принимаются сечения из одного типа жесткости стержней; далее из заранее определенного набора типоразмеров труб подбирается наиболее близкое по несущей способности к действующему усилию в стержне сечение. Несущая способность стержня определяется по прочности – для растянутого стержня и по устойчивости – для сжатого в соответствии с [3].

Рассматривались следующие варианты конструкции покрытия:

- из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами в каждой ячейке одного направления («сетка-диагональ»); поверхность покрытия криволинейная из окружностей с максимальной стрелкой подъема в центре покрытия высотой 3 м (рис. 1);

- из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами со сменой направления в каждой следующей ячейке («сетка-зигзаг»); поверхность покрытия криволинейная из окружностей с максимальной стрелкой подъема в центре покрытия высотой 3 м (рис. 2);

- из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами с расположением осесимметрично относительно центра покрытия с образованием расходящихся от центра ромбов («сетка-ромб»); поверхность покрытия криволинейная из окружностей с максимальной стрелкой подъема в центре покрытия высотой 3 м (рис. 3);

- из правильных шестиугольников по цилиндрической поверхности покрытия («соты 6») со стрелкой подъема в центре покрытия высотой 3 м (рис. 4);

- из чередующихся правильных шестиугольников и треугольников по цилиндрической поверхности покрытия, образованных стержнями трех направлений, два из которых направлены под углом в 60^0 к стержням третьего направления («соты 6 и 3») со стрелкой подъема в центре покрытия высотой 3 м (рис. 5).

Первые два варианта – «сетка-диагональ» и «сетка-зигзаг» – по деформациям дали наибольшие прогибы, и подробный их анализ не представлен.

Выбор рациональных типов сечений стержней в структурных конструкциях покрытий возрастает с ростом числа стержней в конструкции (тысячи элементов); анализ напряженно-деформированного состояния в табличной форме проводить с таким большим числом стержней крайне затруднительно [4, 5].

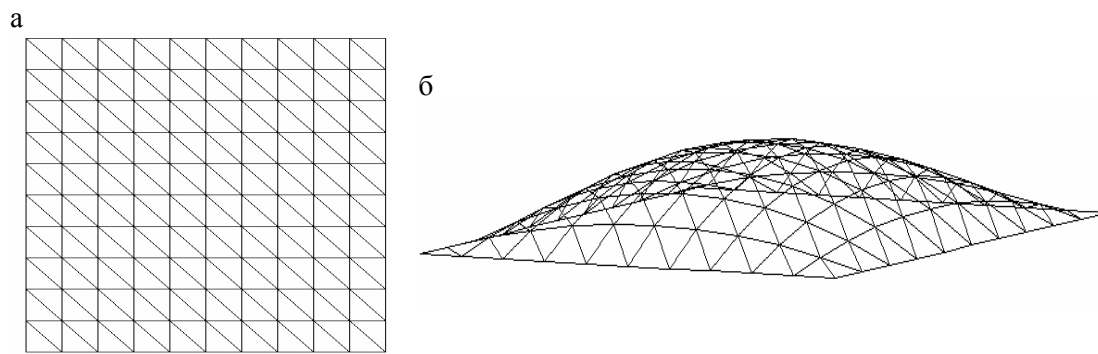


Рис. 1. Схема покрытия из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами в каждой ячейке одного направления («сетка-диагональ»):
а – план конструкции; б – изометрия

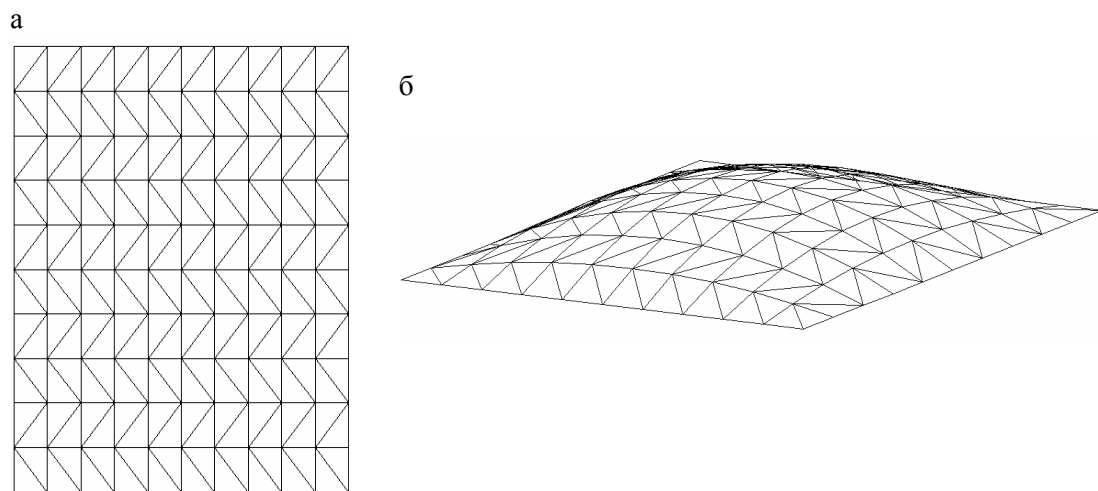


Рис. 2. Схема покрытия из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами со сменой направления в каждой следующей ячейке («сетка-зигзаг»):
а – план конструкции; б – изометрия

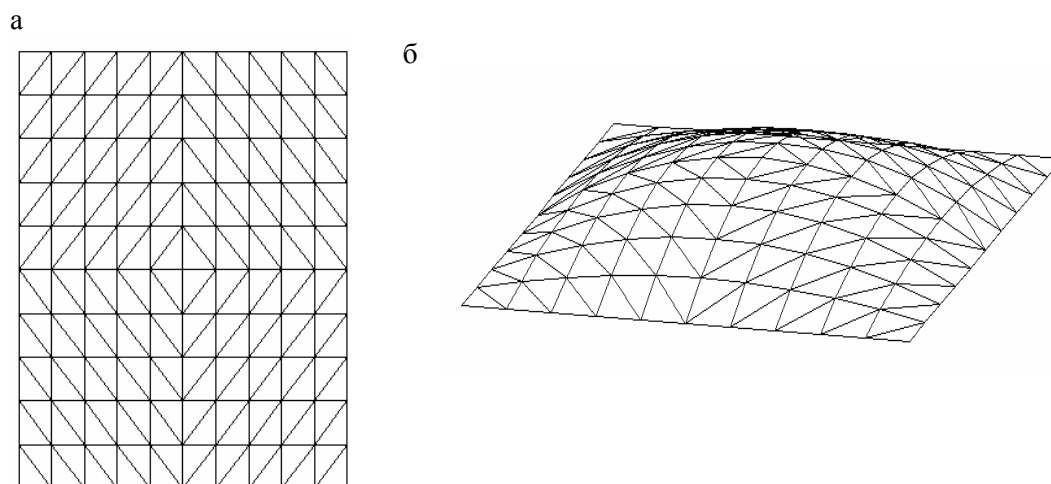


Рис. 3. Схема покрытия из прямоугольной сетки стержневых элементов с диагональными элементами с расположением осесимметрично относительно центра покрытия с образованием расходящихся от центра ромбов («сетка-ромб»):
а – план конструкции; б – изометрия

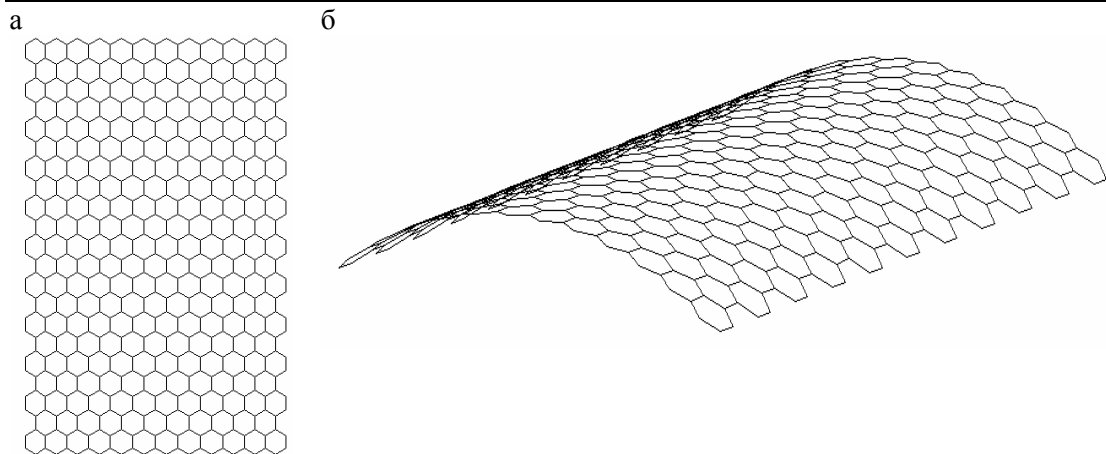


Рис. 4. Схема покрытия из правильных шестиугольников по цилиндрической поверхности покрытия («соты 6»):

а – план конструкции; б – изометрия

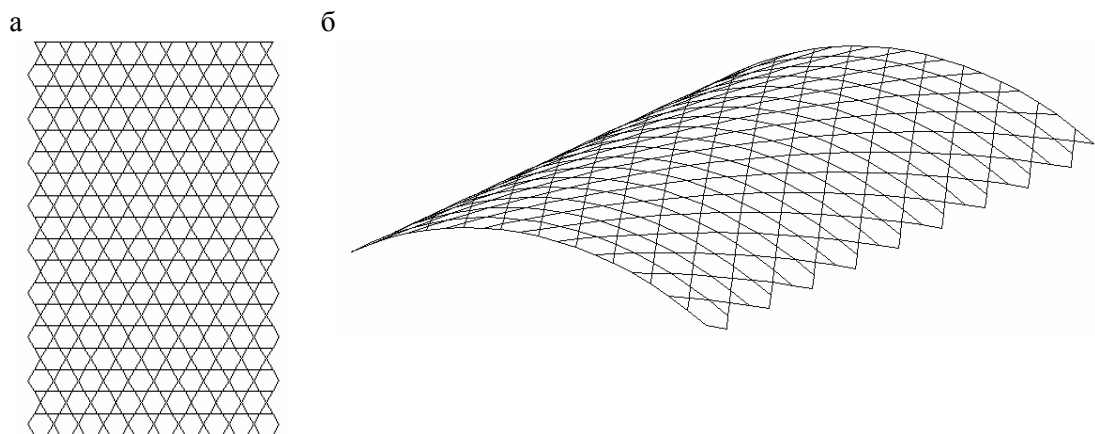


Рис. 5. Схема покрытия из чередующихся правильных шестиугольников и треугольников по цилиндрической поверхности покрытия, образованных стержнями трех направлений, два из которых направлены под углом в 60° к стержням третьего направления («соты 6 и 3»):

а – план конструкции; б – изометрия

Результаты компоновки стержневой конструкции покрытия типа «сетка-ромб». В первом варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 31 типоразмера труб (от 25×4 до 630×10); компоновка завершена за 5 шагов перерасчетов; подобраны стержни 14 типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	272
2	28x4	Tip2-Тр28x4	32
3	38x4	Tip3-Тр38x4	192
4	42x4	Tip4-Тр42x4	168
5	45x4	Tip5-Тр45x4	112
6	50x4	Tip6-Тр50x4	150
7	54x4	Tip7-Тр54x4	156
8	57x4	Tip8-Тр57x4	96
9	60x4	Tip9-Тр60x4	20
10	63.5x4	Tip10-Тр63.5x4	18
11	68x4	Tip11-Тр68x4	14
12	73x4	Tip13-Тр73x4	6
13	83x4	Tip15-Тр83x4	2
14	95x4	Tip16-Тр89x4	2
Вес стержней конструкции 7077.08 кг			

Для второго варианта компоновки было сокращено число типоразмеров труб до 14 (от 25×4 до 140×7). Компоновка завершена за 3 шага перерасчетов. Подобраны стержни 9 различных типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25х4	Tip1-Тр25х4	272
2	38х4	Tip3-Тр38х4	220
3	42х4	Tip4-Тр42х4	172
4	45х4	Tip5-Тр45х4	112
5	50х4	Tip6-Тр50х4	158
6	54х4	Tip7-Тр54х4	148
7	57х4	Tip8-Тр57х4	96
8	68х4	Tip11-Тр68х4	52
9	95х4	Tip16-Тр89х4	10
<i>Вес стержней конструкции 7190.53 кг</i>			

Для третьего варианта компоновки было оставлено 9 типоразмеров труб. Компоновка завершена за 4 шага перерасчетов. Подобраны стержни 5 различных типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25х4	Tip1-Тр25х4	272
2	42х4	Tip4-Тр42х4	396
3	50х4	Tip6-Тр50х4	270
4	57х4	Tip8-Тр57х4	236
5	95х4	Tip16-Тр89х4	66
<i>Вес стержней конструкции 7655.981кг</i>			

Для четвертого варианта компоновки было оставлено 5 типоразмеров труб. Компоновка завершена за 3 шага перерасчетов. Подобраны стержни 3 различных типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25х4	Tip1-Тр25х4	272
2	50х4	Tip6-Тр50х4	658
3	95х4	Tip16-Тр89х4	310
<i>Вес стержней конструкции 9323.993 кг</i>			

Для последнего варианта компоновки было оставлено 2 типоразмера труб. Компоновка завершена за 1 шаг перерасчетов. Подобраны стержни одного типа:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	95х4	Tip16-Тр89х4	1240
<i>Вес стержней конструкции 15691.98 кг</i>			

На рис. 6 и 7 дается зависимость веса элементов покрытия (без учета влияния веса узловых соединений стержней) от количества использованных типов стержней в покрытии.



Рис. 6. Зависимости веса элементов стержневой конструкции покрытия (типа «сетка-ромб») от количества используемых типов сечений

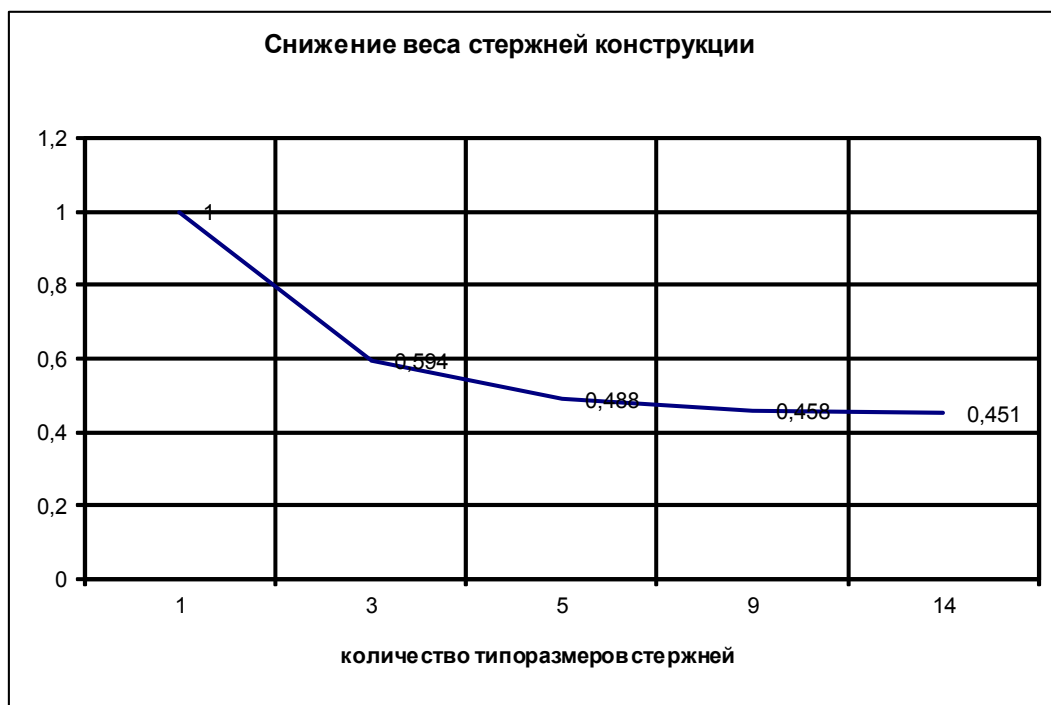


Рис. 7. Зависимости снижения относительного веса конструкции покрытия (типа «сетка-ромб») по сравнению с использованием одного типа сечения при увеличении количества используемых типов сечений

Результаты компоновки стержневой конструкции покрытия типа «соты 6». Для анализа влияния количества типоразмеров сечений стержней в конструкции покрытия этого типа на вес конструкции рассматривались следующие четыре варианта.

В первом варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 31 типоразмера труб (от 25×4 до 630×10). Компоновка завершена за 14 шагов перерасчетов. Подобраны стержни 6 типов:

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	26
2	68x4	Tip11-Тр68x4	171
3	70x4	Tip12-Тр70x4	294
4	73x4	Tip13-Тр73x4	200
5	76x4	Tip14-Тр76x4	88
6	83x4	Tip15-Тр83x4	12
<i>Вес стержней конструкции 5127.651 кг</i>			

Во втором варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 6 типоразмеров труб (от 25x4 до 630x10). Компоновка завершена за 6 шагов перерасчетов. Подобраны стержни 4 типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	26
2	68x4	Tip11-Тр68x4	175
3	73x4	Tip13-Тр73x4	490
4	83x4	Tip15-Тр83x4	100
<i>Вес стержней конструкции 5274.622 кг</i>			

В третьем варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 4 типоразмеров труб. Компоновка завершена за 3 шага перерасчетов. Подобраны стержни 3 типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25 x 4	Tip1-Тр25x4	26
2	70 x 4	Tip12-Тр70x4	475
3	83 x 4	Tip15-Тр83x4	290
<i>Вес стержней конструкции 5405.714 кг</i>			

Последний вариант предусматривал использование одного типа стержней:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	83x4	Tip15-Тр83x4	791
<i>Вес стержней конструкции 6162.651 кг</i>			

На графике (рис. 8) приведена зависимость снижения веса элементов структурной конструкции покрытия (без учета влияния веса узловых соединений стержней) от количества использованных типов стержней в покрытии.

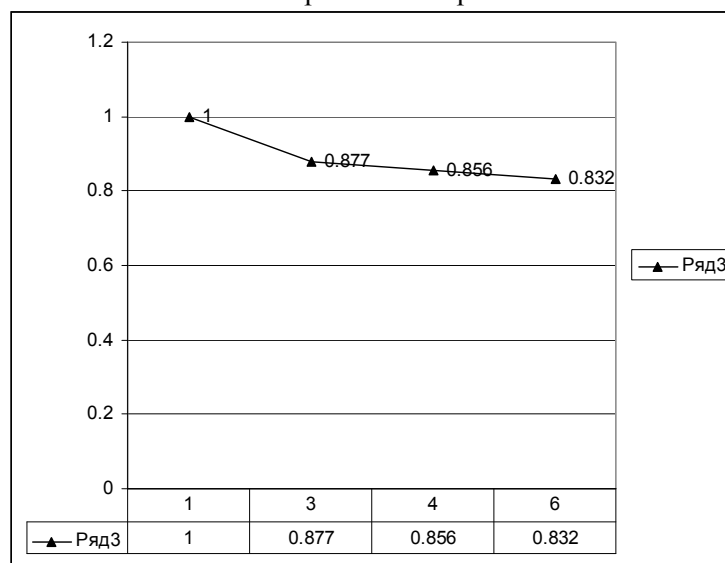


Рис. 8. График зависимости снижения относительного веса конструкции покрытия (типа «соты 6») по сравнению с использованием одного типа сечения при увеличении количества используемых типов сечений

Анализ покрытия из шестиугольников и треугольников («соты 6 и 3»). Для анализа влияния количества типоразмеров сечений стержней в конструкции покрытия этого типа на вес конструкции рассматривались следующие пять вариантов.

В первом варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 15 типоразмеров труб:

№ п/п	Сечение	Площадь, см ²	Радиус инерции, см	Вес, кг/м	Тип сечения
1	25x4	2.05	0.756	2.07	«Tip1-Тр25x4»
2	38x4	3.02	1.21	3.35	«Tip3-Тр38x4»
3	50x4	3.9	1.632	4.54	«Tip6-Тр50x4»
4	60x4	4.64	1.985	5.52	«Tip9-Тр60x4»
5	68x4	5.23	2.267	6.31	«Tip11-Тр68x4»
6	76x4	5.81	2.55	7.1	«Tip14-Тр76x4»
7	95x4	7.21	3.22	8.98	«Tip17-Тр95x4»
8	121x4	9.11	4.139	11.54	«Tip21-Тр121x4»
9	133x4	9.99	4.563	12.73	«Tip23-Тр133x4»
10	152x7	11.57	5.132	25.03	«Tip25-Тр152x7»
11	159x7	33.43	5.38	26.24	«Tip26-Тр159x7»
12	180x7	13.62	6.121	29.87	«Tip27-Тр180x7»
13	245x10	18.57	8.316	57.95	«Tip28-Тр245x10»
14	203x10	15.49	6.833	47.6	«Tip29-Тр203x10»
15	325x10	24.43	11.143	77.68	«Tip30-Тр325x10»

Подобраны стержни 10 типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	178
2	38x4	Tip3-Тр38x4	138
3	50x4	Tip6-Тр50x4	266
4	60x4	Tip9-Тр60x4	236
5	68x4	Tip11-Тр68x4	116
6	76x4	Tip14-Тр76x4	53
7	95x4	Tip17-Тр95x4	56
8	121x4	Tip21-Тр121x4	26
9	133x4	Tip23-Тр133x4	8
10	152x7	Tip25-Тр152x7	4
Вес стержней конструкции 5876.983 кг			

Во втором варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 8 типоразмеров труб:

№ п/п	Сечение	Площадь, см ²	Радиус инерции, см	Вес, кг/м	Тип сечения
1	25x4	2.05	0.756	2.07	«Tip1-Тр25x4»
2	50x4	3.9	1.632	4.54	«Tip6-Тр50x4»
3	68x4	5.23	2.267	6.31	«Tip11-Тр68x4»
4	95x4	7.21	3.22	8.98	«Tip17-Тр95x4»
5	133x4	9.99	4.563	12.73	«Tip23-Тр133x4»
6	152x7	11.57	5.132	25.03	«Tip25-Тр152x7»
7	180x7	13.62	6.121	29.87	«Tip27-Тр180x7»
8	245x10	18.57	8.316	57.95	«Tip28-Тр245x10»

Были подобраны стержни 6 типов:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	182
2	50x4	Tip6-Тр50x4	420
3	68x4	Tip11-Тр68x4	338
4	95x4	Tip17-Тр95x4	103
5	133x4	Tip23-Тр133x4	34
6	152x7	Tip25-Тр152x7	4
<i>Вес стержней конструкции 6329.61 кг</i>			

В третьем варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 5 типоразмеров труб:

№ п/п	Сечение	Площадь, см ²	Радиус инерции, см	Вес, кг/м	Тип сечения
1	25x4	2.05	0.756	2.07	«Tip1-Тр25x4»
2	68x4	5.23	2.267	6.31	«Tip11-Тр68x4»
3	133x4	9.99	4.563	12.73	«Tip23-Тр133x4»
4	180x7	13.62	6.121	29.87	«Tip27-Тр180x7»
5	245x10	18.57	8.316	57.95	«Tip28-Тр245x10»

Были подобраны 3 типа:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	178
2	68x4	Tip11-Тр68x4	783
3	133x4	Tip23-Тр133x4	120
<i>Вес стержней конструкции 7365.937 кг</i>			

В четвертом варианте компоновки предусматривался выбор типов стержней покрытия из 3 типоразмеров труб:

№ п/п	Сечение	Площадь, см ²	Радиус инерции, см	Вес, кг/м	Тип сечения
1	25x4	2.05	0.756	2.07	«Tip1-Тр25x4»
2	133x4	9.99	4.563	12.73	«Tip23-Тр133x4»
3	180x7	13.62	6.121	29.87	«Tip27-Тр180x7»

Были подобраны 2 типа:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	25x4	Tip1-Тр25x4	196
2	133x4	Tip23-Тр133x4	885
<i>Вес стержней конструкции 12582.97кг</i>			

В последнем варианте компоновки предусматривался один тип стержней покрытия:

№ п/п	Сечение	Тип сечения	Количество стержней
1	133x4	Tip23-Тр133x4	1081
<i>Вес стержней конструкции 14811.81 кг</i>			

На графике (рис. 9) приведена зависимость снижения веса элементов структурной конструкции покрытия (без учета влияния веса узловых соединений стержней) от количества использованных типов стержней в покрытии.



Рис. 9. График зависимости снижения относительного веса конструкции покрытия (типа «соты 6 и 3») по сравнению с использованием одного типа сечения при увеличении количества используемых типов сечений

Из указанного выше следует, что наиболее рациональным является использование 3 типов сечений стержней в структурном покрытии. Использование 1, 2 типов сечений стержней приводит к чрезмерному перерасходу материала (в среднем в 2 раза) по сравнению с использованием 3 типов сечений стержней. Увеличение числа типоразмеров сечений не дает значительного снижения веса, но значительно усложняет изготовление и монтаж конструкции из-за увеличения трудоемкости работ. Наиболее жесткой (менее деформативной) является схема покрытия из чередующихся правильных шестиугольников и треугольников по цилиндрической поверхности покрытия, образованных стержнями трех направлений, два из которых направлены под углом в 60^0 к стержням третьего направления («соты 6 и 3»). Здесь максимальные перемещения узлов при рассмотрении двух загрузок (собственный вес и снег) при рациональном размещении типов стержней минимальны по сравнению с другими типами покрытий.

Как видим, схема однослойного структурного покрытия из чередующихся правильных шестиугольников и треугольников по цилиндрической поверхности покрытия, образованных стержнями трех направлений, два из которых направлены под углом в 60^0 к стержням третьего направления («соты 6 и 3»), является наиболее рациональной по деформативности, а по материалоемкости наиболее рациональным является использование трех типов жесткостей. Схема размещения типов сечений стержней для выбранного варианта структурного покрытия приводится на рис. 10.

Диаграмма снижения веса конструкции покрытия при наиболее рациональном размещении жесткостей 3 типов стержней для пяти рассматриваемых вариантов компоновки приводится на рис. 11.

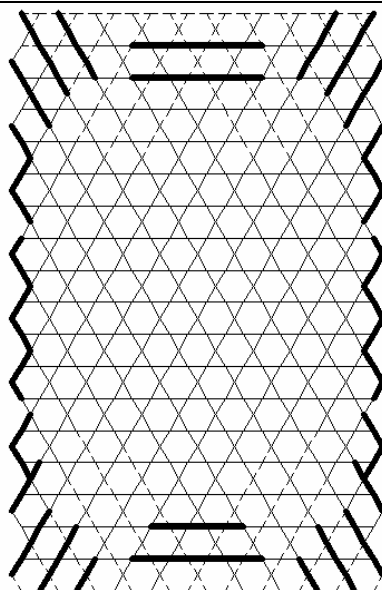


Рис. 10. Схема размещения типов сечений стержней в структурном покрытии (план покрытия)
(условные обозначения типов сечений стержней: пунктирная линия – Tr25x4, сплошная тонкая линия – Tr68x4, сплошная толстая линия – Tr133x4)

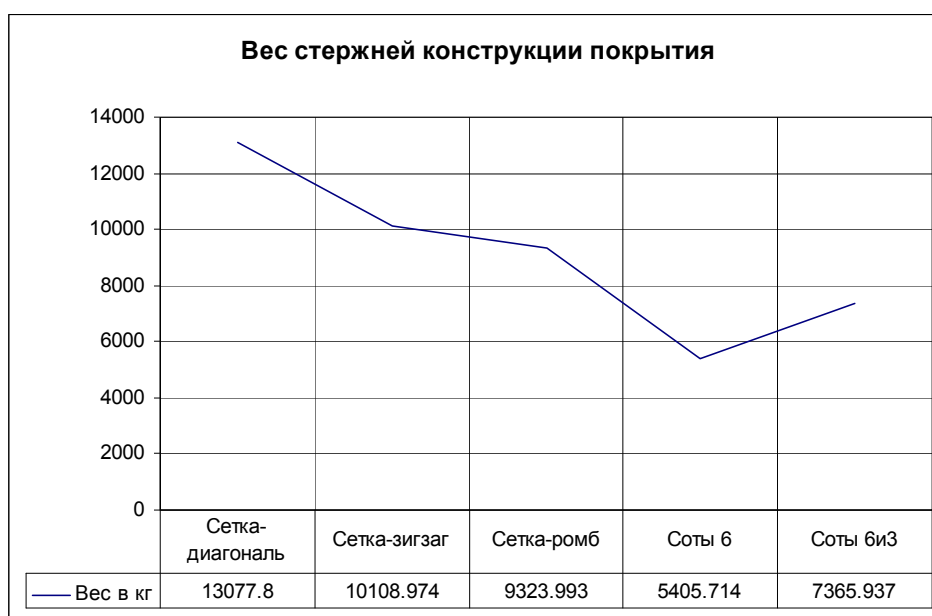


Рис. 11. Диаграмма снижения веса конструкции покрытия при наиболее рациональном размещении 3 типов жесткостей стержней для пяти рассматриваемых вариантов компоновки

Выводы:

1. Приведен ряд вариантов компоновок прямоугольного в плане однослойного структурного покрытия заданного типоразмера.
2. По предложенной авторами методике компоновки жесткостей в однослойных структурных покрытиях определены рациональные по металлоемкости размещения типов сечений стержней при ограниченном сортаменте круглых труб; экономия металла может достигать от 14 до 60 %.
3. Показано, при использовании более 3–5 типоразмеров стержневых элементов в однослойных структурных покрытиях существенного снижения металлоемкости не наблюдается.

Список литературы

1. Серов, И.Л. Методы расчета статически неопределимых ферм с обеспечением минимального веса / И.Л. Серов // Строительная механика и строительные конструкции: сборник научных трудов. Вып. 23. – Л., 1956. – С. 67–84.
2. Дымолазов, М.А. Компоновка рациональная по весу сечений стержней многократно статически неопределимых шарнирно-стержневых конструкций / М.А. Дымолазов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сборник статей XV Международной научно-технической конференции / под ред. Н.Н. Ласькова. – 2015. – С. 55–63.
3. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: Стандартинформ, 2019. – 180 с.
4. Айзатуллин, М.М. Цифровое моделирование и САПР в определении напряженно-деформированного состояния сооружений / М.М. Айзатуллин, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина, И.К. Киямов, М.К. Сайфетдинова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – №9.
5. Мирхасанов, Р.Ф. Использование металлического каркаса как преобладание формы над содержанием в объемно-пространственной композиции / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 1 (43). – С. 61–65.

References

1. Serov, I.L. Methods for calculating statically indeterminate trusses with minimum weight / I.L. Serov // Structural mechanics and building structures: Collection of scientific papers. Issue 23. – L., 1956. – P. 67–84.
2. Dymolazov, M.A. Rational layout by the weight of rod sections of repeatedly statically indeterminate hinged-rod structures / M.A. Dymolazov // Effective building structures: theory and practice: Collection of articles from the XV International Scientific and Technical Conference. Edited by N.N. Laskov. – 2015. – P. 55–63.
3. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81*. – M.: Standartinform, 2019. – 180 p.
4. Aizatullin, M.M. Digital modeling and CAD in determining the stress-strain state of structures / M.M. Aizatullin, L.S. Sabitov, I.A. Garkina, I.K. Kiyamov, M.K. Saifetdinova // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2024. – №9.
5. Mirkhasanov, R.F. Use of a metal frame as a predominance of form over content in a volumetric-spatial composition / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2023. – №. 1 (43). – P. 61–65.

Инженерная Академия Российского
университета дружбы народов

Россия, 117198, Москва,
ул. Миклухо-Маклая, 6, РУДН

Гринько Елена Алексеевна,
заведующий лабораторией «Сопротивление
материалов»
E-mail: grinko-ea@rudn.ru

Academy of Engineering, Peoples' Friendship
University of Russia, RUDN University
Russia, 117198, Moscow, 6, Miklukho-
Maklaya St.

Grinko Elena Alekseevna,
Head of the Materials Resistance Laboratory
E-mail: grinko-ea@rudn.ru

ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР И ОБОЛОЧЕК СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е.А. Гринько

Появление типовых вычислительных комплексов, использующих численные методы расчета, вызвало повышенный интерес к проектированию и строительству криволинейных объектов. Однако очень мало работ посвящено исследованию классификации криволинейных пространственных структур и оболочек по критериям выбранных конструктивных решений, технологических и функциональных соответствий. Отмечено, что наиболее полная классификация была предложена Б.А. Миронковым и О.В. Василенко. Предложен доработанный и расширенный вариант классификации, содержащий 9 типов криволинейных сооружений и тонких оболочек. Представленный вариант классификации проиллюстрирован на конкретных примерах и указаны работы других авторов, подтверждающие выводы, изложенные в статье.

Ключевые слова: пространственные конструкции на пролет, жесткие оболочки, системы регулярной структуры, висячие системы, пневматические оболочки, комбинированные покрытия, трансформируемые жесткие структуры, пространственные тонкостенные составные конструкции

THE TYPES OF SPATIAL CURVILINEAR STRUCTURES AND SHELLS OF BUILDING PURPOSE

Е.А. Grinko

The appearance of typical computing complexes using numerical methods of analysis has given rise to increased interest to design and construction of curvilinear objects. But not enough works are devoted to classification of curvilinear space structures and shells using criterions of constructive solutions, technological and functional conformities. The most complete classification is offered by B.A. Mironkov and O.V. Vasilenko. Modified and expanded version of classification containing nine types of curvilinear structures and thin shells is offered. This presented variant of classification is illustrated by real examples and scientific works of other authors. They confirm the conclusions given in this paper.

Keywords: space structures on span, rigid shell, system of regular structure, hanging system, pneumatic shell, combined roofing, transformed rigid structure, space thin-walled compound structure

Введение. В последнее время отмечается широкое распространение численных методов расчета пространственных систем и оболочек. Появилось много типовых вычислительных комплексов, дающих возможность рассчитать на прочность, устойчивость, динамику практически любую криволинейную структуру или оболочку. В связи с этим повысился интерес к проектированию и строительству оболочек строительного назначения разнообразной формы, которые можно описать как аналитическими формулами [1], так и с помощью числовых отметок [2]. Появилось много работ, дока-

зывающих преимущества тех или иных геометрических форм для применения в строительстве [3–6].

Намного меньше работ посвящено классификации, анализу, хронологии использования [7] и преимуществам применения [8] различных конструкционных материалов [9, 10]. В статье [7] предпринята попытка составить хронологию появления различных конструкционных строительных материалов для построенных оболочечных структур (черные металлы, клееная фанера, армоцемент, железобетон, стеклопластики и др.). В разные исторические эпохи архитекторы и инженеры отдавали предпочтение тому или иному конструкционному материалу. Еще меньше работ посвящено классификации криволинейных пространственных конструкций и зданий. Наиболее полно этот вопрос раскрыт в монографиях [11, 12]. Самая простая классификация пространственных сооружений предложена в работе [11], где предлагается разделить оболочки на 2 типа: 1) отдельно стоящие оболочки и 2) составные оболочки. В первую группу включены оболочки нулевой, положительной и отрицательной гауссовой кривизны. Вторая группа содержит четыре вида составных оболочек: 1) оболочки с квадратным и треугольным планом, 2) оболочки с вытянутым планом, 3) купольно-складчатые оболочки и 4) полигональные оболочки с циклическим планом.

В монографии [12] в основу классификации пространственных структур положены четыре группы признаков статического формообразования: 1) конструкции с преобладающими внутренними изгибающими моментами; 2) конструкции, работающие в основном на сжатие; 3) конструкции, работающие в основном на растяжение; 4) безыгбные системы, работающие на сжатие-растяжение. Эта классификация подходит как для плоскостных, так и для криволинейных пространственных конструкций. Для криволинейных пространственных конструкций и сооружений можно применить более широкую классификацию, в основе которой лежит вид конструктивной системы, способы производства, принципы сборности и т.д. Предложенные авторами [12] пять классов криволинейных конструкций и сооружений будут взяты за основу деления криволинейных сооружений, рассмотренных далее, с небольшим расширением.

ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР И ОБОЛОЧЕК

Пространственные конструкции на пролет

Эти структуры можно разделить на конструкции, работающие в основном на изгиб (рис. 1а) и работающие в основном на сжатие (рис. 1б, рис. 2а).



а) Курский вокзал (балочная схема)



б) Арочный алюминиевый самонесущий ангар

Рис. 1. Конструкции, работающие в основном на изгиб

В статье [13] приведено большое число конкретных примеров складчатых сооружений. Складчатые конструкции и складки – это тонкостенные строительные конструкции, состоящие из плоских элементов (пластинок-граней), соединённых между собой под некоторыми двугранными углами. Различают четыре вида статических схем складчатых конструкций: балочную (рис. 1а), арочную (рис. 2б), рамную и складчатые оболочки, причисляемые к типу «жесткие оболочки».

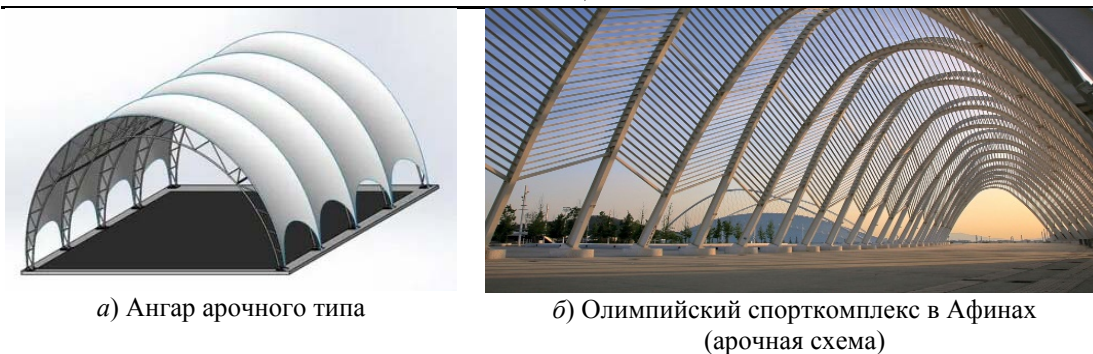
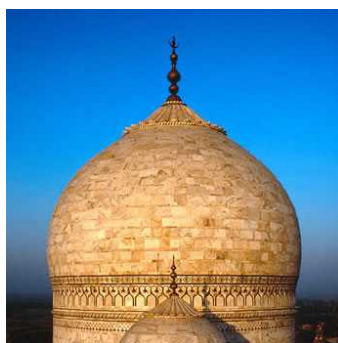


Рис. 2. Конструкции, работающие в основном на сжатие

Жесткие оболочки

К этому типу оболочек в основном принадлежат каменные (рис. 3,а), железобетонные [1] (рис. 3,б), армицементные, композитные полимерные (стеклопластиковые) оболочки (рис. 3,в) и оболочки из клееной фанеры. Для расчета оболочек этого типа применимы системы расчетных уравнений линейной теории тонких оболочек, заданных в линиях кривизн [14] и в произвольной системе криволинейных координат [15].

На рис. 3 представлены основные группы жестких оболочек без усиления, а на рис. 4,а, 5 даны жесткие оболочки, усиленные ребрами.



а) Центральный купол мавзолея мечети Тадж-Махал, 1653 г.



б) Черемушкинский рынок, Москва (круговая поверхность переноса)



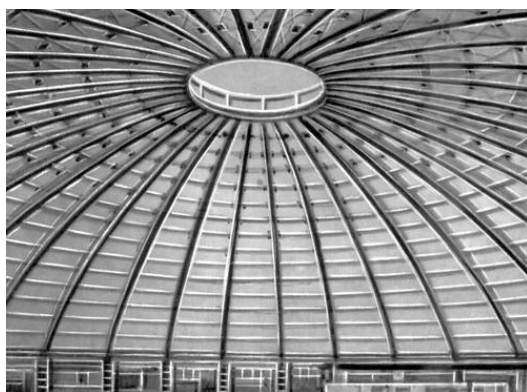
в) Стеклопластиковая зонтичная оболочка РЛС (ОАО «Авангард»)

Рис. 3. Жесткие оболочки без усиления из белого мрамора (а), из железобетона (б), из стеклопластика (в)

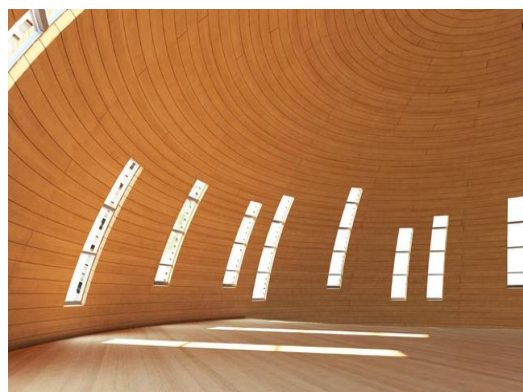
Считается, что впервые патент на использование ребер для усиления тонкостенных армицементных покрытий был выдан П.Л. Нерви в 1936 году. В большинстве своих сооружений П.Л. Нерви использовал сети из армированных пересекающихся балок. Сверху ребер укладывался армицементный слой толщиной 2 см.

Начиная с 1950-х годов, деревянные купола и своды строились в больших масштабах, большая часть из них – с меридиональными клееными ребрами (рис. 4,а).

Есть примеры деревянных тонкостенных сплошных оболочек из бруса без усиления ребрами (рис. 4,б).



а) Спортивное сооружение
близ Ньюкасл- апон-Тайн
(Newcastle upon Tyne, 1950-1960)



б) Тонкостенная сплошная оболочка из бруса
(компания «Биоархитектура»)

Рис. 4. Ребристый деревянный (а) и деревянный сплошной (б) купола

Монолитные железобетонные купола выполняют обычно гладкими, сборные – из ребристых панелей (рис. 5).

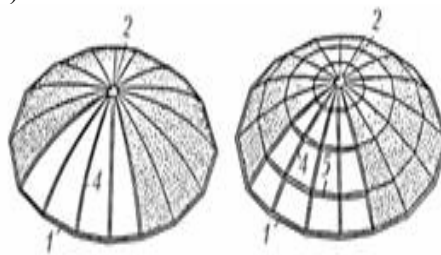


Рис. 5. Два типа ребристых железобетонных куполов:

1 – нижнее опорное кольцо; 2 – фонарное кольцо; 4 – ребро купола; 5 – кольцо

Как уже отмечалось, некоторые складчатые оболочки причисляются к типу «жесткие оболочки» (рис. 6). Оболочки этого типа в настоящее время выполняются в основном по канонам параметрической архитектуры.



Рис. 6. Центр Франкофонной Африки, Котону, Бенин

Системы регулярной структуры

Этот тип криволинейных пространственных структур включает в себя сетчатые оболочки (купола, своды) и криволинейные структуры оболочечного типа. Наиболее подробно эти системы описаны в статьях [2, 8] и в монографии [12].



а) Регулярный структурный свод, Дмитровский район, Московская обл.



б) Сферическая сетчатая оболочка, Москва

Рис. 7. Пространственные регулярные структуры из металлических стержней

К системам регулярной пространственной структуры относят регулярные конструкции, испытывающие сжимающие или растягивающие внутренние усилия, а также регулярные решетки, работающие на изгиб. Эти структуры имеют много положительных свойств [8]. Конструкции выполняются из металла (рис. 7, а, б), железобетона, дерева (рис. 8, а, б) и пластмасс.



а) Самая большая в мире структурная конструкция из дерева. Metropol Parasol, г. Севилья, Испания



б) Законченный каркас ребристо-кольцевого купола

Рис. 8. Пространственные регулярные структуры из дерева

Эта категория криволинейных пространственных структур появилась сравнительно недавно. Они составляют основу нелинейной архитектуры [16] и цифровой архитектуры [17]. В некоторых работах предлагают использовать автоматизированное проектирование систем регулярной структуры [18].

Висячие системы

Этот тип пространственных систем охватывает широкий круг конструкций криволинейной формы и оболочек. В него входят вантовые и тросовые структуры, мембраны, тентовые конструкции и комбинированные покрытия. В висячих конструкциях внешнюю нагрузку воспринимают тросы (стальные канаты), кабели, цепи, прокатный металл и листовые мембраны, работающие только на растяжение.

Вантовые структуры

В висячих вантовых системах ванты (нити) или тросовые плоские, или пространственные фермы поддерживают жесткие элементы (балки, плиты, арки, рамы),

работающие на изгиб, в проектном положении, а на эти жесткие элементы укладывают ограждающие конструкции. К *вантовым структурам* относят также конструкции, в которых ванты являются стабилизирующими элементами или участвуют в создании геометрического образа сооружения [19]. Ванты иногда называют *открытыми тросами*.



а) The Lawn Tennis Association's National Tennis Centre, Лондон, 2008



б) Тросово-вантовая структура



в) Сиднейская телебашня, 2005, Австралия, <http://www.enci.ru/>

Рис. 9. Вантовые структуры

Вантовые структуры в зависимости от их конструктивных особенностей и назначения в статье [19] разделены на 5 групп, причем каждая группа содержит 2–4 подгруппы. На рис. 9,а показана висячая вантовая структура, поддерживающая в отдельных точках тентовое покрытие. Группа «Вантовые стабилизирующие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий» представлена сооружением на рис. 9,б. Разновидность вантовых структур «Вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперboloида с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперboloида», где гибкие ванты воспринимают только растягивающие усилия, представлены на рис. 9,в. Эти структуры выделены в отдельную группу, т.к. здесь ванты в отличие от висячих структур обеспечивают устойчивость сооружению.

Ермолов В.В. [20] указал в табличной форме 8 основных схем установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях. Некоторые сведения по расчету вант приводятся в работе [21].

Тросовые структуры

Висячие тросовые конструкции (тросовые сети) отличаются от вантовых систем тем, что ограждающие элементы в них укладываются непосредственно на тросы или тросовую сеть.

Одним из первых тросовых сооружений стала крытая хоккейная площадка, запроектированная Е. Саариненом (E. Saarinen) и построенная в 1958 г. Эта тросовая структура в форме поверхности отрицательной гауссовой кривизны создается центральной криволинейной железобетонной аркой пролетом 90 м и тросами, проходящими через арку и закрепленными на опорах по обе стороны от арки (рис. 10,а). По тросам уложено деревянное покрытие. Это сооружение Американским институтом архитекторов (American Institute of Architects) включено в 2007 году в список знаменитых сооружений США.

Гигантский «Хан Шатыр» является самым большим шатром в мире (рис. 10,б). Этот торгово-развлекательный центр считается висячим тросовым сооружением, так как его покрытие формируется сетью стальных тросов, подвешенных к центральному столбу. Тросы покрыты полимерным покрытием ETFE, которое в России выпускается под маркой «Фторопласт-40». Этот проект Н. Фостера в Астане по версии журнал Forbes Style входит в десятку лучших экологических зданий в мире.



а) Спортивное сооружение, New Haven, Connecticut, USA (фото Carol M. Highsmith)



б) Ханский шатер, Астана, Казахстан, открыт в июле 2010 г.

Рис. 10. Тросовые структуры

Покрывтия с жесткими нитями (тросами)

Иногда возникает необходимость вместо тросов применить стержневые элементы из профильной стали. Эти сооружения формируют разновидность висячего покрытия «Покрывтия с жесткими нитями». Жесткую провисающую нить закрепляют в крайних точках на опорах. Например, в Ереване (Армения) над двухзальным кинотеатром «Россия» (рис. 11) покрытие осуществлено в виде системы нитей из швеллеров, соединенных поперечными прогонами из двутавров. Кривизна швеллерам придана заранее на заводе [12]. Считается, что проектирование осуществлялось по канонам футуристической архитектуры из архитектурной группы «Функционализм».



Рис. 11. Кинотеатр «Россия» в Ереване, Армения

В статье [22] приведено большое количество примеров тросовых структур и сооружений, дается их описание и хронология их появления.

Мембранные покрытия

Стальная мембрана воспринимает только растягивающие напряжения. Мембранные покрытия рассчитывают по геометрически нелинейной теории тонких оболочек. Сооружения этого типа строят реже, чем, например, тентовые, сетчатые металлические конструкции или оболочки из клееной древесины. Но все построенные сооружения с мембранными покрытиями становятся широко известными и часто цитируемыми.

В зависимости от принятой конструктивной схемы мембранного покрытия их разделяют на ленточные покрытия и мембранные оболочки. Ленточные покрытия образуются из отдельных, не связанных между собой лент (рис. 12,а). В мембранных оболочках отдельные ленты сопрягаются в сплошную пространственную конструкцию, способную воспринимать сдвигающие усилия (рис. 12,б).



а) Ледовый дворец спорта «Ермак» в г. Ангарск в процессе строительства (раскладка полотнищ по временным элементам «постели»)



б) Крытый каток в г. Коломне в процессе строительства, введен в эксплуатацию в 2009 г., проектирование ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Рис. 12. Мембранные покрытия

Методика расчета висячей мембраны покрытия сооружения с учетом упруго-пластических деформаций дана в работе [23]. В некоторых зарубежных публикациях мембранные покрытия и тентовые структуры включают в один тип пространственных структур. Более подробно мембранные покрытия описываются в статье [24].

Тентовые структуры

До XXI века тентовая архитектура не выделялась в отдельное архитектурное направление. Однако возросшие потребности в тентовых сооружениях дали возможность архитекторам и инженерам создать ряд интересных каркасно-тентовых покрытий, куполов, бескаркасных тентовых сооружений и сооружений с висячим тентовым покрытием. Появились как маломерные тентовые павильоны (рис. 13а), так и большепролетные каркасно-тентовые конструкции (рис. 13,б). Нашлось место для тентовых структур и в архитектурной инсталляции (рис. 13,в). Несколько конструктивных форм тентовых сооружений, появившихся в 1970-х годах, представлены в [12]. Это – тентовые многогранные структуры с деревянным каркасом, тканево-каркасная конструкция, конструкция из панелей с тканевой обшивкой и др. Появились работы по расчету покрытий пленочно-каркасных павильонов [25].

Однако несмотря на замечательные сооружения, созданные в рамках тентовой архитектуры, некоторые историки архитектуры пространственных структур считают, что тема тентовой архитектуры недостаточно проработана. Другие, такие, как О.В. Мыскова и И.А. Казусь [26, 27], утверждают: «Тентовые сооружения – это конструкции архитектуры будущего, образующие пространства, освобожденные от громоздких внутренних структур».



а) Маломерные тентовые павильоны



б) Спортивное сооружение, компания «VIP Sport Construction», Азербайджан, vipsport.az



в) Тентовая структура в парке, teniradi.ru

Рис. 13. Тентовые структуры

Пневматические оболочки

Пневматические оболочки разделяются на воздухоопорные (воздухонадувные) оболочки и воздуhonесомые покрытия. Пневматическими конструкциями (оболочками) называются мягкие безмоментные оболочки, форма которых обеспечивается за счет избыточного давления воздуха, нагнетаемого непрерывно под оболочку, или за счет герметичных несущих пневмобаллонов, наполненных воздухом и служащих несущими конструкциями [28]. Пневматические конструкции изобретены в 40-х годах XX века. Первая строительная пневматическая конструкция с размерами в плане 60×20 м и высотой 6 м для проектного бюро появилась в 1946 году в г. Хемел-Хемпстед.

Преимущества пневматических конструкций, такие, как быстрота возведения, достаточно низкая стоимость строительства, светопрозрачность, были подвергнуты сомнениям в связи с проблемами уборки снега, потенциальных возможностей накопления воды, провисания покрытия и относительно высокой стоимостью эксплуатации.

На данный момент около ста тысяч пневмосооружений и конструкций смонтированы на всех континентах мира, их изготавливают во всех технически развитых странах [2].

Воздухоопорные оболочки

Воздухоопорная оболочка состоит из шлюза для перехода, оболочки, вентилятора и калорифера (рис. 14,а). Воздухоопорные сооружения подразделяются еще на два типа: *сооружения с гладкими куполами* (рис. 14,а) и *сооружения, усиленные сетями из стальных тросов* для устойчивости к ветру и снегу (рис. 14,б).

Несколько примеров существующих большепролетных воздухоопорных оболочек приведены в работе [29]. Лутес Д. [30] утверждал, что воздухоопорные оболочки наиболее предпочтительны для некоторых сооружений. Однако они непригодны для применения в некоторых районах Канады из-за климатических условий.



а) Выставочный центр агрокомбината «Московский», 35×35 м, (www.vector-in.com)



б) Воздухоопорное пневматическое сооружение из двухслойного материала с утеплителем и сетью металлических оцинкованных тросов

Рис. 14. Воздухоопорные оболочки

Воздуhonесомые покрытия

Пневмокаркасы, пневмоматы и пневмолинзы, наполненные воздухом с избыточным давлением до 100 кН/м², появились в 1980-х годах. Пневмокаркасы (рис. 15,а) и пневмоматы (рис. 15,б) используются в форме арок, а пневмолинзы – в форме подушки. Пневмолинзы применялись в комплексе ботанического сада «Eden project», г. Сент-Остелл, Англия, год открытия – 2001.



а) Надувная мобильная палатка «Арка» (компания «Пневмосибирь»)



б) Воздуhonесомое сооружение (пневмомат), ООО ТЕНТ ПЛЮС

Рис. 15. Воздуhonесомые покрытия

Комбинированные покрытия

При проектировании некоторых сооружений желательно применять не какой-либо определенный давно изученный класс конструкций и сооружений, а комбинацию конструктивных форм или элементов.

Комбинированные пневматические конструкции состоят из воздухоносных и воздухоопорных фрагментов. К этой группе относят и *смешанные пневмоконструкции*, основным несущим элементом которых является жесткий каркас из дерева, алюминия, стали или каркас малой изгибной жесткости из канатов или оттяжек. По каркасу укладывают мягкую оболочку, под которой создается избыточное давление.

Криволинейные стержневые структуры, покрытые тентом, состоят из жесткого каркаса из деревянных брусьев или металлических стержней. Их конструктивная схема отличается от тентовых структур (рис. 13,а), где тенты включены в расчетную схему. В комбинированном покрытии тент служит только как ограждающая составляющая.

Применение комбинированных вантовых покрытий можно продемонстрировать на примере Дворца спортивных игр «Зенит» в Санкт-Петербурге. Здесь применена арочно-вантовая ферма.

Трансформируемые жесткие и пневматические структуры и покрытия

Трансформируемые жесткие и пневматические структуры и покрытия обычно проектируются по критериям адаптивной архитектуры.

Адаптивная архитектура – это развивающаяся область архитектурной практики, которая измеряет состояние окружающей среды, адаптируя свою форму, цвет или функцию к целям наибольшего соответствия требованиям эксплуатации [31]. К адаптивной архитектуре относится вид архитектурных объектов, которые демонстрируют способность изменять свои характеристики в соответствии с изменениями условий эксплуатации (рис. 16). Термин «адаптивная архитектура» появился в конце 1960-х годов.



Павильон с мобильными навесами, Штутгарт, ФРГ



Модель программируемого павильона “NSA Muscle” из пневматической мембраны, обтянутой сеткой, 2003 г.

Рис. 16. Сооружения, выполненные по критериям адаптивной архитектуры

К этому типу сооружений относят также раздвижные купола стадионов.

Металлические тонкостенные емкости, резервуары, сосуды, газгольдеры

Как видно из названия этого типа тонкостенных оболочек, обозначенная категория криволинейных сооружений включает в себя большое разнообразие емкостей для хранения газов и жидкостей [32]. Их тонкие стенки выдерживают только растягивающие нормальные напряжения, поэтому в реальных условиях эксплуатации им необходимо подкрепление ребрами.

Тонкостенные пространственные составные конструкции

Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. [11] предлагают выделить в отдельную группу тонкостенные пространственные составные конструкции. Если составные тонкостенные оболочки, образованные совокупностью элементов поверхностей, пересекающихся между собой (рис. 3,в), можно причислить к одной из восьми уже рассмотренных групп, то тонкостенные пространственные составные конструкции иногда трудно поддаются распределению по этим восьми группам. В указанной работе [11] приведены несколько схем классификаций пространственных конструкций с учетом их объемно-планировочных и конструктивных решений. По конструктивным особенностям можно включить в девятую группу составные висячие оболочки с центрическим планом, складчатые покрытия висячего типа, комбинации оболочек, составных складок и вант и некоторые другие структуры. Особенности этих пространственных конструкций, исследование их напряженно-деформированного состояния и примеры зданий подробно рассматриваются в монографии [11]. Этот тип пространственных конструкций очень близок к комбинированным покрытиям, а иногда и полностью совпадает.

Результаты исследования

Установлено, что все пространственные криволинейные структуры и оболочки можно распределить по 9 группам согласно их конструктивным решениям, технологическим и функциональным характеристикам, а именно: 1) пространственные конструкции на пролет; 2) жесткие оболочки; 3) системы регулярной структуры; 4) висячие системы; 5) пневматические оболочки; 6) комбинированные покрытия; 7) трансформируемые жесткие и пневматические структуры и покрытия; 8) металлические тонкостенные емкости; 9) тонкостенные пространственные составные конструкции.

Некоторые типы оболочечных структур трудно поддаются классификации, поэтому они включены в основные типы структур, но в качестве подгрупп. Предпоследний восьмой тип изделий из тонкостенных металлических материалов сгруппирован исключительно с учетом функциональных особенностей.

Главной особенностью криволинейных пространственных конструкций является функциональная технологичная целесообразность выбранной конструктивной формы. Также они должны удовлетворить архитектурным требованиям градостроительного порядка. Заключительным шагом в выборе типа сооружения является выбор расчетной схемы, методов аналитического или численного расчета на прочность, устойчивость, а при необходимости – и динамического расчета. В статье для каждого типа сооружений приводятся соответствующие источники с большим числом библиографии. Это обеспечит облегченный поиск необходимой информации по всем вопросам проектирования рассматриваемых структур и оболочечных сооружений.

Заключение

В связи с появлением типовых вычислительных комплексов, использующих численные методы расчета, значительно возрос интерес к проектированию и строительству криволинейных объектов, поэтому материалы, содержащиеся в статье, могут стать полезными архитекторам и инженерам-проектировщикам, выбирающими приемлемый тип сооружения для конкретного объекта.

Список литературы

1. Мамиева, И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях / И.А. Мамиева // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 150–165. – URL: <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/201>.
2. Кривошапко, С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре / С.Н. Кривошапко // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 3. – С. 20–30. – DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30.

3. Krivoshapko, S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells / S.N. Krivoshapko // *Applied Mechanics Reviews (USA)*. – May 1999. – Vol. 52, No 5. – P. 161–175. – DOI: 10.1115/1.3098932 EID: 2-s2.0-0032639253.
4. Krasić, Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi / Sonja Krasić; Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. – Niš: Štampa Galaksija, 2012. – 238 c.
5. Mamieva, I.A. Influence of the geometrical researches of rare type surfaces on design of new and unique structures / I.A. Mamieva, G.L. Gbaguidi-Aisse // *Building and Reconstruction*. – 2019. – № 5(85). – P. 23–34.
6. Коротич, А.В. Инновационные решения архитектурных оболочек: альтернатива традиционному строительству / А.В. Коротич // *Академический Вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2015. – № 4. – С. 70–75.
7. Кривошапко, С.Н. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. Часть 2: Конструкционные строительные материалы / С.Н. Кривошапко, Л.А. Алборова, И.А. Мамиева // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2021. – № 4. – С. 110–119. – DOI 10.22337/2077-9038-2021-4-110-119.
8. Кривошапко, С.Н. Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX-го – первой половины XX-го веков / С.Н. Кривошапко // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2014. – № 6. – С. 4–15.
9. Varghese, P.C. Design of Reinforced Concrete Shells and Folded Plates / P.C. Varghese. – New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. – 334 p. – ISBN-978-81-203-4111-1
10. Перцева, А.Е. Опыт применения большепролетных клееных деревянных конструкций / А.Е. Перцева, Н.С. Хижняк, Н.С. Астафьева // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2018. – №3. – 10 с. – URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS318.pdf>
11. Дыховичный, Ю.А. Пространственные составные конструкции / Ю.А. Дыховичный, Э.З. Жуковский. – М.: Высшая школа, 1989. – 288 с. – ISBN 5-06-000553-4.
12. Морозов, А.П. Пространственные конструкции общественных зданий / А.П. Морозов, О.В. Василенко, Б.А. Миронков. – Л.: Стройиздат, 1977. – 168 с.
13. Strashnov, S.V. Folded surfaces in architecture / S.V. Strashnov, S.M. Mabhena, L.An. Alborova // *Building and Reconstruction*. – 2022. – № 2 (100). – С. 75–84.
14. Новожилов, В.В. Линейная теория тонких оболочек / В.В. Новожилов, К.Ф. Черных, Е.И. Михайловский. – Л.: Политехника, 1991. – 656 с. – ISBN 5-7325-0127-4.
15. Goldenveizer, A.L. Theory of Elastic Thin Shells / A.L. Goldenveizer. – New York: Published by Pergamon Press New York, 1961. – 544 p.
16. Воличенко, О.В. Концепции нелинейной архитектуры / О.В. Воличенко // *Архитектон: известия вузов*. – 2013. – № 44 (декабрь). – С. 21–39. – ISSN 1990-4196.
17. Челноков, А.В. Методы формообразования в цифровой архитектуре / А.В. Челноков, Д.А. Корниенко // *Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры*. – 2013. – № 6. – С. 25–29.
18. Свентиков, А.А. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы / А.А. Свентиков, Д.Н. Кузнецов // *Строительство и реконструкция*. – 2021. – № 1 (93). – С. 38–49. – DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49
19. Krivoshapko, S.N. Cable-stayed structures for public and industrial buildings / S.N. Krivoshapko // *Строительство и реконструкция*. – 2019. – № 1 (81). – С. 23–47.
20. Голосов, В.Н. Инженерные конструкции: уч. для вузов по спец. «Архитектура» / В.Н. Голосов, В.В. Ермолов, Н.В. Лебедева [и др.]. – М.: Высшая школа, 1991. – 408 с.
21. Кужахметова, Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения / Э.Р. Кужахметова // *Известия КГТУ*. – 2019. – № 52. – С. 154–168.
22. Кривошапко, С.Н. Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений / С.Н. Кривошапко // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2015. – № 7 (34). – С. 51–70.
23. Доль, Д.В. Методика расчета висячей мембраны покрытия сооружения с учетом упруго-пластических деформаций с применением линейных сплайнов / Д.В. Доль,

Ю.В. Ким, Г.С. Шумейко // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 2. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/02/31749> (дата обращения: 01.12.2023).

24. Krivoshapko, S.N. Thin sheet metal suspended roof structures / S.N. Krivoshapko // Thin-Walled Structures. – October 2017. – Vol. 119. – P. 629–634. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.014>.

25. Блажнов, А.А. Статический расчёт плёночной кровли культивационного сооружения / А.А. Блажнов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 10. – С. 17–22.

26. Мыскова, О.В. Тентовые конструкции в архитектуре советского авангарда 1920-х годов / О.В. Мыскова, И.А. Казусь // Технологии строительства. – 2003. – № 1. – С. 134–137.

27. Мыскова, О.В. Тентовые сооружения в современной архитектуре / О.В. Мыскова // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – № 7. – С. 41–42.

28. Кривошапко, С.Н. Пневматические конструкции и сооружения / С.Н. Кривошапко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – № 3. – С. 45–53.

29. Wright Bruce, N. Air support / N. Wright Bruce // Fabric Architecture. – October 1. 2015. – URL: <https://fabricarchitecturemag.com/2015/10/01/air-support/>.

30. Lutes, D.A. Air-supported structures / D.A. Lutes // Canadian Building Digest. – May 1971-05. – 7 p. – URL: <https://doi.org/10.4224/4000841>.

31. Ahmet Vefa Orhon. Adaptive Building Shells / Ahmet Vefa Orhon // In book: Developments in Science and Engineering. Chapter: 39. October 2016. Publisher: St. Kliment Ohridski University Press. Editors: Recep Efe, Lia Matchavariani, Abdulkadir Yaldir, László Lévai.

32. Гринько, Е.А. Каплевидные оболочки / Е.А. Гринько // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 6 (287). – С. 50–56.

References

1. Mamieva, I.A. Analytical surfaces for parametrical architecture in contemporary buildings and structures / I.A. Mamieva // Academia. Architecture and Construction. – 2020. – No 1. – P. 150–165 (in Russian). – URL: <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/201>.

2. Krivoshapko, S.N. Shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture / S.N. Krivoshapko // Building and Reconstruction. – 2020. – № 3. – P. 20–30. – DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30.

3. Krivoshapko, S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells / S.N. Krivoshapko // Applied Mechanics Reviews (USA). – May 1999. – Vol. 52, No 5. – P. 161–175. – DOI: 10.1115/1.3098932 EID: 2-s2.0-0032639253.

4. Krasić, Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi / Sonja Krasić; Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. – Niš: Štampa Galaksija, 2012. – 238 c.

5. Mamieva, I.A. Influence of the geometrical researches of rare type surfaces on design of new and unique structures / I.A. Mamieva, G.L. Gbaguidi-Aisse // Building and Reconstruction. – 2019. – № 5(85). – P. 23–34.

6. Korotich, A.V. Innovative solutions of architectural shells: the alternative for traditional building / A.V. Korotich // Akademicheskij Vestnik UralNIIproekt RAASN. – 2015. – № 4. – P. 70–75.

7. Krivoshapko, S.N. Shell structures: genesis, materials, and subtypes. Part 2: Constructive building materials / S.N. Krivoshapko, L.A. Alborova, I.A. Mamieva // Academia. Architecture and Construction. – 2021. – № 4. – P. 110–119. – DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-110-119.

8. Krivoshapko, S.N. Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIXth until the first half of the XXth centuries / S.N. Krivoshapko // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2014. – № 6. – P. 4–15.

9. Varghese, P.C. Design of Reinforced Concrete Shells and Folded Plates / P.C. Varghese. – New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. – 334 p. – ISBN-978-81-203-4111-1

10. Pertceva, A.E. Experience with the use of large-span LVL constructions / A.E. Pertceva, N.S. Khizhnyak, N.S. Astafieva // Russian journal of transport engineering. – 2018. – №3 (5). – URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS318.pdf>. – DOI: 10.15862/02SATS318
11. Dykhovichniy, Yu.A. Space Compound Structures / Yu.A. Dykhovichniy, E.Z. Zhukovskiy. – M.: Vysshaya Shkola, 1989. – 288 p. – ISBN 5-06-000553-4.
12. Morozov, A.P. Space Structures of Public Buildings / A.P. Morozov, O.V. Vasilenko, B.A. Mironkov. – L.: Stroyizdat, 1977. – 168 p.
13. Strashnov, S.V. Folded surfaces in architecture / S.V. Strashnov, S.M. Mabhena, L.An. Alborova // Building and Reconstruction. – 2022. – № 2 (100). – C. 75–84.
14. Novozhilov, V.V. Linear Theory of Thin Shells / V.V. Novozhilov, K.F. Chernikh, E.I. Mikhailovskiy. – L.: Politehnika, 1991. – 656 p. – ISBN 5-7325-0127-4
15. Goldenveizer, A.L. Theory of Elastic Thin Shells / A.L. Goldenveizer. – New York: Published by Pergamon Press New York, 1961. – 544 p.
16. Volichenko, O.V. Conceptions of non-linear architecture / O.V. Volichenko // Architecton: Izvestiya vuzov. – 2013. – № 44 (December). – P. 21–39. – ISSN 1990-4196.
17. Chelnokov, A.V. Methods of forming in digital architecture / A.V. Chelnokov, D.A. Kornienko // Vestnik Pridneprovskoy Gos. Akademii Stroitelstva i Arhitektury. – 2013. – № 6. – P. 25–29.
18. Sventikov, A.A. Computer-aided design of spatial lattice steel structures for coatings of complex shape / A.A. Sventikov, D.N. Kuznetsov // Building and Reconstruction. – 2021. – № 1 (93). – P. 38–49. – DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49
19. Krivoshapko, S.N. Cable-stayed structures for public and industrial buildings / S.N. Krivoshapko // Building and Reconstruction. – 2019. – № 1 (81). – P. 23–47.
20. Golosov, V.N. Engineering Structures / V.N. Golosov, V.V. Ermolov, N.V. Lebedeva [et al.]. – M.: Vysshaya Shkola, 1991. – 408 p.
21. Kuzhakhmetova, E.R. Deformation of stay cables when subjected to various loadings / E.R. Kuzhakhmetova // Izvestiya KGTU. – 2019. – № 52. – P. 154–168.
22. Krivoshapko, S.N. Suspension cable structures and roofs of erections / S.N. Krivoshapko // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2015. – №7 (34). – P. 51–70.
23. Dol, D.V. Methods of calculating the hanging membrane of coating facilities, taking into account elastic-plastic deformations using linear splines / D.V. Dol, Yu.V. Kim, G.S. Shumeyko // Modern scientific research and innovation. – 2014. – № 2. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/02/31749>.
24. Krivoshapko, S.N. Thin sheet metal suspended roof structures / S.N. Krivoshapko // Thin-Walled Structures. – October 2017. – Vol. 119. – P. 629–634. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.014>.
25. Blazhnov, A.A. Static calculation of membrane roofing for cultivation structures / A.A. Blazhnov // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2020. – No 10. – P. 17–22. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-17-22
26. Myskova, O.V. Tent structures in architecture of Soviet vanguard of the 1920s / O.V. Myskova, I.A. Kazus // Technologii Stroitelstva. – 2003. – № 1. – P. 134–137.
27. Myskova, O.V. Tent erection in modern architecture / O.V. Myskova // Industrial and civil engineering. – 2003. – № 7. – P. 41–42.
28. Krivoshapko, S.N. Pneumatic structures and buildings / S.N. Krivoshapko // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2015. – № 3. – P. 45–53.
29. Wright Bruce, N. Air support / N. Wright Bruce // Fabric Architecture. – October 1. 2015. – URL: <https://fabricarchitecturemag.com/2015/10/01/air-support/>.
30. Lutes, D.A. Air-supported structures / D.A. Lutes // Canadian Building Digest. – May 1971-05. – 7 p. – URL: <https://doi.org/10.4224/4000841>.
31. Ahmet Vefa Orhon. Adaptive Building Shells / Ahmet Vefa Orhon // In book: Developments in Science and Engineering. Chapter: 39. October 2016. Publisher: St. Kliment Ohridski University Press. Editors: Recep Efe, Lia Matchavariani, Abdulkadir Yaldir, László Lévai.
32. Grinko, E.A. Drop-shaped shells / E.A. Grinko // Construction mechanics and calculation of structures. – 2019. – № 6 (287). – P. 50–56.

УДК 624.04:691.11-413

DOI 10.54734/20722958_2024_4_142

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

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Karpov5656@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

Karpov Vladimir Nikolayevich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Constructions»
E-mail: Karpov5656@mail.ru

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ РЕБЕР ПАНЕЛЕЙ ПОЛНОСБОРНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ДОМОВ

В.Н. Карпов

Приводятся результаты исследования несущей способности и жесткости ребер панелей, выполненных путем склеивания низкосортных досок по пласти без предварительного сращивания по длине и ширине. На основе проведенных исследований показана возможность использования таких ребер в панелях полносборных деревянных домов с целью широкого применения пиломатериалов недефицитных сортов и размеров сечений без снижения надежности и долговечности панельных конструкций малоэтажных жилых домов.

Ключевые слова: несущая способность, жесткость, ребра, панели, деревянные дома, разрушающая нагрузка, пороки пиломатериала, упругопластическая деформация, коэффициент запаса, надежность и долговечность

BEARING CAPACITY AND STIFFNESS OF PANELS RIBS OF FULLY PREFABRICATED WOODEN HOUSES

V.N. Karpov

The results of a study of the bearing capacity and stiffness of panels ribs made by gluing low-grade boards along the face without preliminary splicing along the length and width are presented. Based on the research, the possibility of using such ribs in panels of fully prefabricated wooden houses has been shown for the purpose of wide use of lumber of non-scarce varieties and section sizes without reducing the reliability and durability of panel structures of low-rise residential buildings.

Keywords: load-bearing capacity, stiffness, ribs, panels, wooden house, destructive load, defects of lumber, elastic-plastic deformation, safety factor, reliability and durability

Крупномасштабное производство полносборных деревянных домов, выполненных из промышленных клееных панелей ребристой структуры с деревянным несущим каркасом, требует большого расхода высокосортной древесины дефицитных сечений, что не может не сказаться на стоимости выпускаемых домостроительными комбинатами домов.

В качестве основных несущих ребер панелей полносборных деревянных домов используют, как правило, пиломатериалы 1-го и 2-го сорта. При небольших размерах поперечного сечения они обычно выполняются из цельных досок согласно установленному сортаменту. Однако следует отметить, что сечение досок высотой 175 мм и более является дефицитным, и при массовом производстве панелей это может существенно сказаться на реальной мощности комбинатов.

Настоящее исследование направлено на устранение указанных недостатков и на решение вопроса о возможности использования низкосортных пиломатериалов

сравнительно малых, а значит, недефицитных сечений в качестве несущих ребер в панелях перекрытия.

Целью данной работы является исследование несущей способности и жесткости продольных ребер панелей перекрытия, склеенных из досок по пласти с использованием пиломатериалов недефицитных сортов и размеров сечений в соответствии с сортаментом без предварительного сращивания отрезков пиломатериалов по длине и ширине, а также выбор клеевого состава, используемого для склеивания досок, что обеспечивает широкое применение таких ребер в панельных конструкциях без снижения надежности и долговечности малоэтажных полносборных деревянных жилых домов.

При исследовании несущей способности ребер с целью учета влияния пороков пиломатериала (сучков, трещин, обзола и т.п.) важным является не только их наличие, но также их взаимное расположение по длине и ширине образца, возможные вариации и сочетания их в сечениях. В проводимых экспериментальных исследованиях использовались образцы с размерами поперечных сечений 44×144 мм, соответствующих размерам несущих ребер панелей перекрытий полносборного деревянного дома.

Для исследования влияния расположения продольных и поперечных стыков досок в ребрах экспериментальные образцы были изготовлены с различным расположением стыков как по длине, так и по ширине образца. Использовались доски 2, 3, 4-го сортов с поперечным сечением после острожки 22×120 мм; 22×68 мм. Способ изготовления заготовки основан на непрерывном склеивании дощатой ленты шириной 480 мм. Общий вид склеиваемой непрерывной ленточной заготовки показан на рис. 1.

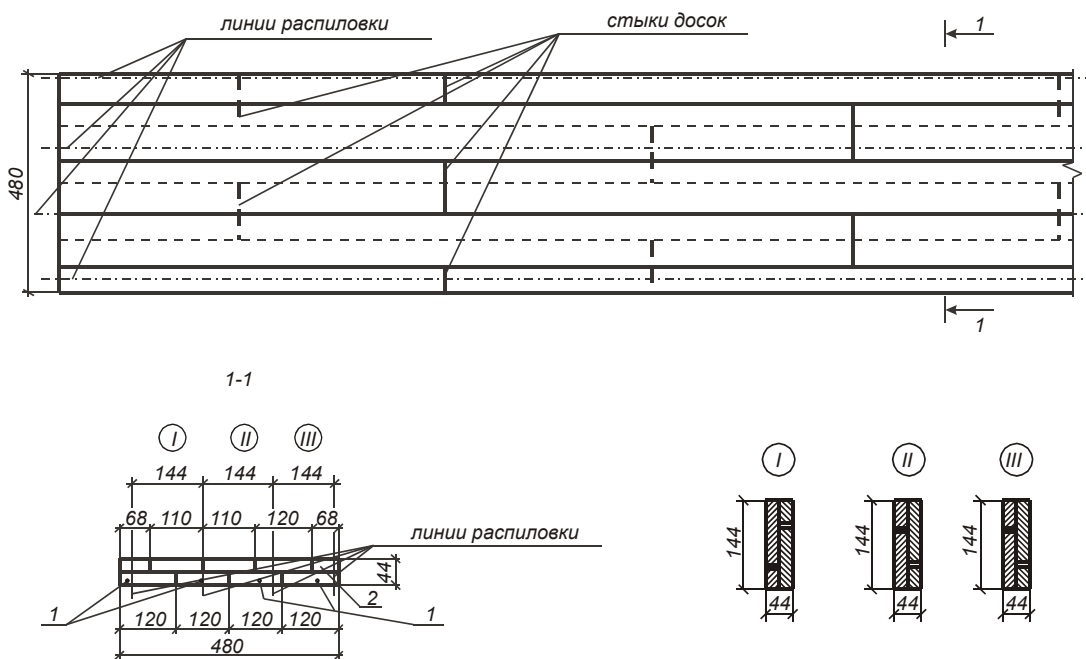


Рис. 1. Общий вид заготовки

После распиловки склеенной заготовки на отдельные элементы, используемые в качестве ребер панелей, производилась отбраковка их по сортам древесины и образовавшимся дефектам. Для оценки влияния сортности древесины на несущую способность и возможность применения ребер, выполненных из низкосортного пиломатериала, выполнялась сортировка образцов по сортам древесины в каждом слое.

В результате сортировки, производимой в соответствии с нормативными документами, были получены серии образцов со следующими сортами слоев: 2 – 2, 2 – 3, 3 – 3, 3 – 4, 4 – 4. Почти во всех образцах поперечные стыки одного из слоя досок оказывались близкими к середине пролета. В некоторых образцах сучки выходили на кромку ребра. В двух образцах в результате неплотного прижатия досок в процессе

склеивания пакета образовались зазоры между досками и в двух образцах наблюдался непрочный склей.

Для выявления влияния клеевых составов на несущую способность и жесткость ребер была изготовлена 2-я партия образцов, сортировка которой производилась аналогично 1-й партии. Экспериментальные образцы первой партии были изготовлены на карбамидном клее, вторая партия – на клее ПВА.

Форма и размеры экспериментальных образцов продольных ребер были приняты такими же, как в реальных конструкциях панелей перекрытий полносборного дома. Схема испытаний приближена к статической схеме работы ребер в процессе их эксплуатации, поэтому испытание ребер проводилось по балочной схеме (рис. 2).

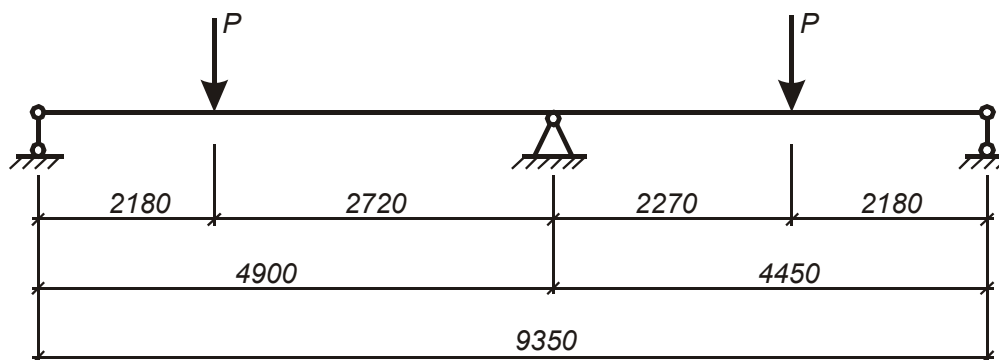


Рис. 2. Схема испытания образцов

Нагрузка на образец передавалась в виде двух сосредоточенных сил и создавалась гидравлическими домкратами, подключаемыми к одной насосной станции. Передача нагрузки осуществлялась этапами, после каждого из которых проводился осмотр испытываемого образца и снятие отсчетов с приборов. Фиксировались прогиб и величина разрушающей нагрузки ($P_{\text{разр}}$), характер разрушения и время с момента нагружения до начала разрушения.

За момент разрушения принималось одно из следующих явлений:

а) наличие явных признаков разрушений (разрыв волокон, поперечный излом, скалывание древесины, разрушение клеевых стыков);

б) непрерывный рост деформаций (прогибов) при неизменной величине нагрузки.

Почти для всех образцов получены "классические" диаграммы работы древесины как упругопластического материала с явно наметившимся участком пластических деформаций на последней стадии нагружения. Разрушение образцов происходило в основном по поперечному стыку досок слоев образца в пролетах. Часть образцов разрушилась по сучкам и косослою, имеющимся в древесине. Следует заметить, что большое количество сучков в древесине почти во всех образцах не могло не сказаться и на преждевременном их разрушении по поперечному стыку.

Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

За величину $P_{\text{расч}}$ принималась нагрузка (сила P), которая вызывала в ребре, согласно принятой схеме испытания, нормальные напряжения, равные расчетному сопротивлению древесины.

Для оценки несущей способности были подсчитаны коэффициенты запаса для каждого образца по формуле

$$K = \frac{P_{\text{разр}}}{P_{\text{расч}}}.$$

Результаты испытаний клеодощатых ребер (1-я партия)

Номер образца	Расчетная нагрузка $P_{расч.}$, кН	Разрушающая нагрузка $P_{разр.}$, кН	Максимальные усилия при действии $P_{разр.}$		Максимальные напряжения		Максимальный прогиб, при $P=0,8P_{расч.}$, мм	Коэффициент запаса $K=P_{разр.}/P_{расч.}$	Требуемый коэффициент надежности
			M , кН·м	Q , кН	σ , МПа	τ , МПа			
1	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	16,1	2,57	2,36
2	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	17,5	2,57	2,37
3	1,38	4,86	4,14	3,31	28,9	1,66	23,0	3,52	2,36
4	1,38	4,86	4,14	3,31	28,9	1,66	20,0	3,52	2,36
5	1,38	4,86	4,44	3,31	28,9	1,66	23,0	3,52	2,36
6	1,38	6,63	5,65	4,52	39,5	2,26	20,0	4,80	2,34
7	1,38	4,42	3,76	3,01	26,3	1,51	24,0	3,20	2,38
8	1,38	4,42	3,76	3,01	26,3	1,51	24,0	3,20	2,38
9	1,38	4,86	4,14	3,31	28,9	1,66	18,0	3,52	2,36
10	1,38	5,74	4,89	3,91	34,2	1,96	19,0	4,16	2,35
11	1,38	4,00	3,41	2,73	23,8	1,37	24,0	2,90	2,38
12	1,38	4,42	3,76	3,01	26,3	1,51	19,0	3,20	2,38
13	1,38	5,30	4,51	3,61	31,5	1,81	21,0	3,84	2,36
14	1,38	5,74	4,89	3,91	34,2	1,96	15,0	4,16	2,35
15	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	21,0	2,57	2,38

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний клеодощатых ребер (2-я партия)

Номер образца	Расчетная нагрузка $P_{расч.}$, кН	Разрушающая нагрузка $P_{разр.}$, кН	Максимальные усилия при действии $P_{разр.}$		Максимальные напряжения		Максимальный прогиб, при $P=0,8P_{расч.}$, мм	Коэффициент запаса $K=P_{разр.}/P_{расч.}$	Требуемый коэффициент надежности
			M , кН·м	Q , кН	σ , МПа	τ , МПа			
1	1,38	4,00	3,40	2,73	23,8	1,37	22,0	2,90	2,35
2	1,38	4,42	3,76	3,01	26,3	1,51	24,0	3,20	2,35
3	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	34,5	2,57	2,36
4	1,38	4,00	3,40	2,73	23,8	1,37	28,5	2,90	2,35
5	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	18,0	2,57	2,36
6	1,38	4,42	3,76	3,01	26,3	1,51	27,5	3,20	2,35
7	1,38	3,54	3,01	2,41	21,0	1,21	35,0	2,57	2,36
8	1,38	3,65	3,10	2,49	21,7	1,25	34,0	2,64	2,37
9	1,38	4,44	3,77	3,02	26,3	1,52	29,5	3,21	2,37
10	1,38	4,44	3,77	3,02	26,3	1,52	35,0	3,21	2,37
11	1,38	3,65	3,10	2,49	21,7	1,25	20,5	2,64	2,37
12	1,38	3,65	3,10	2,49	21,7	1,25	20,5	2,64	2,37

Значения коэффициентов K колеблются в довольно широких пределах. Однако, чтобы делать вывод о достаточности (или недостаточности) этих величин для оценки надежности работы испытанных образцов, необходимо знать величины требуемого коэффициента надежности. Поскольку разрушение образцов пластическое, то этот коэффициент был подсчитан по формуле

$$K_{тр} = 1,38 \cdot (1,94 - 0,116 \cdot \lg t).$$

Из произведенных расчетов видно, что почти все образцы первой партии имеют достаточную надежность ($K > K_{тр}$), исходя из работы древесины по 3-му сорту. В отдельных образцах фактические коэффициенты запаса даже значительно превышали величину требуемого коэффициента надежности.

Несколько меньшие коэффициенты запаса получены для образцов ребер второй партии, которые разрушались при меньшей нагрузке и с большим преобладанием доли пластических и полных деформаций. Существенное влияние на работу образцов этой партии оказал вид клея, принятый для склеивания. Клеевое соединение оказалось эластичным и податливым, что в итоге сказалось и на его несущей способности. Образцы в основном разрушались из-за малой прочности клеевого шва. Все это говорит о том, что выбору типа клея нужно уделять большое внимание.

Прогибы испытанных образцов 1-й партии при условной нормативной нагрузке составляли величины от 15 до 24 мм. Для образцов 2-й партии – $18,0 \div 35,0$ мм. А это величины довольно большие, если учесть, что получены при кратковременной нагрузке. Причиной большой деформативности образцов второй партии следует считать высокую эластичность клея или низкую жесткость клеевых соединений.

Положительный вывод из результатов испытаний клееных ребер можно сделать также и потому, что работа их в системе клееной панели будет находиться в более благоприятных условиях. Это связано с тем, что приклеенные к ребрам обшивки будут сглаживать влияние концентраторов напряжений (дефектов) в ребрах и перераспределять усилия между ребрами и обшивками.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования клеодощатых ребер из пиломатериала пониженной сортности (3-го и 4-го) выявили достаточно высокие коэффициенты запаса по прочности, превышающие (для некоторых ребер) требуемые коэффициенты надежности, подсчитанные как для древесины 2-го сорта. Это прежде всего связано с рассредоточением дефектов древесины и стыков досок по длине, толщине и ширине ребра.

2. Разрушение образцов происходило, как правило, вследствие наличия слабых мест (пороков) в древесине, чрезмерно больших и некачественных поперечных стыков досок по длине ребра, особенно, если они находились в опасной (с наибольшими усилиями) зоне работы. Величина разрушающей нагрузки существенно зависела также от качества склеивания досок и типа клея. Эластичные клеевые соединения (2-я партия) существенно снижают прочность и повышают деформативность клеодощатых ребер.

3. Экспериментальные исследования клеодощатых ребер (2-я партия на клее ПВА) показали их высокую деформативность. При действии условной нормативной нагрузки в ребрах (1-я партия на карбамидном клее) возникают максимальные прогибы, равные $\left(\frac{1}{200} \div \frac{1}{327} \right) l$, что соответствует нормативным требованиям.

Таким образом, результаты исследований показали практическую возможность и целесообразность изготовления клеодощатых ребер, склеенных с помощью карбамидного клея из досок пониженной сортности и недефицитных сечений без предварительного их сращивания по длине и сплачивания по ширине, без снижения надежности и долговечности панелей конструкций малоэтажных деревянных полносборных жилых домов.

Список литературы

1. Вдовин, В.М. Полносборный деревянный дом из крупных промышленных панелей: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов; Пензенский ГУАС. – Пенза, 2015. – 148 с.
2. Вдовин, В.М. Поиск оптимальных решений конструкций и рациональных требований к материалам промышленных деревянных домов: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов; Пензенский ГУАС. – Пенза, 2019. – 120 с.

3. Вдовин, В.М. Экспериментально-теоретические исследования промышленных панелей полносборных домов: монография / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов; Пензенский ГУАС. – Пенза, 2020. 120 с.

4. Карпов, В.Н. Исследование пространственной работы полносборного крупнопанельного деревянного дома / В.Н. Карпов // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1. – С. 115–120. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_115.

5. Беляева, З.В. Эффективность применения клееных деревянных конструкций в современном строительстве / З.В. Беляева, Р.И. Разводов // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2019. – №1. – С.74–78. – URL: https://uniip.ru/wp-content/uploads/2019/05/1-201940_13.pdf.

6. Никифоров, Е.П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения / Е.П. Никифоров // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89933> (дата обращения: 14.06.2024).

References

1. Vdovin, V.M. Full-length wooden house from large industrial panels: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov; Penza GUAS – Penza, 2015. – 148 p.

2. Vdovin, V.M. Search for optimal design solutions and rational requirements for materials of industrial wooden houses: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov; Penza GUAS. – Penza, 2019. – 120 p.

3. Vdovin, V.M. Experimental and theoretical studies of industrial panels of prefabricated houses: monograph / V.M. Vdovin, V.N. Karpov; Penza GUAS. – Penza, 2020. – 120 p.

4. Karpov, V.N. Studying spatial work fully precabitable large panel wooden house / V.N. Karpov // Regional architecture and engineering. – 2024. – No 1. – P. 115–120. – DOI: 10.54734/20722958_2024_1_115.

5. Belyaeva, Z.V. Efficiency of using laminated timber structures in modern construction / Z.V. Belyaeva, R.I. Razvodov // Academic bulletin URALNIIPROEKT RAASN. – 2019. – No. 1. – P.74–78. – URL: https://uniip.ru/wp-content/uploads/2019/05/1-201940_13.pdf.

6. Nikiforov, E.P. Laminated wood: manufacturing technology, properties, advantages and disadvantages, areas of application / E.P. Nikiforov // Modern scientific research and innovation. – 2019. – No. 7. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89933> (access date: 06/14/2024).

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Снежкина Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой «Начертательная геометрия
и графика»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Корнюхин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительные конструкции»
E-mail kornuhin@mail.ru

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Snezhkina Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor,
Head of the Department «Descriptive
Geometry and Graphics»
E-mail: o.v.snejkina@yandex.ru

Kornyukhin Anatoly Vladimirovich,
Candidate of Sciences, Associate Professor
of the Department «Building Structures»
E-mail: kornuhin@mail.ru

ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин

На основе результатов сравнительного анализа показано, что нормативные методы расчета не имеют универсального характера и не учитывают ряд факторов, оказывающих влияние на прочность наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов. Предложена математическая модель для оценки влияния геометрических характеристик железобетонных балок на прочность в зоне действия поперечных сил при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 6 по экспериментальным данным.

Ключевые слова: железобетонные балки, наклонное сечение, прочность, относительный пролет среза, моделирование, геометрические характеристики

STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS DURING DESTRUCTION ALONG AN INCLINED SECTION

O.V. Snezhkina, A.V. Kornyukhin

Based on a comparative analysis, it is shown that standard calculation methods are not universal in nature and do not take into account a number of factors that influence the strength of inclined sections of bendable reinforced concrete elements. A mathematical model is proposed for assessing the influence of the geometric characteristics of reinforced concrete beams on the strength in the zone of transverse forces action when the relative shear span a/h_0 changes from 1 to 6 according to experimental data.

Keywords: reinforced concrete beams, inclined section, strength, relative shear span, modeling, geometric characteristics

Существуют различные расчетные модели для оценки прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил. Накоплена обширная база экспериментальных исследований, определяющая формы разрушения железобетонных элементов; традиционно используемая расчетная модель определения прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, принятая в нормативных документах, из-за сложного напряженно-деформированного состояния имеет существенные расхождения с фактическим характером работы конструкций и требует дальнейшего развития [1–4].

Ниже приводится и обосновывается связь прочности наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента с такими факторами, как высота балки h_0 , расстояние от опоры до линии действия сосредоточенной нагрузки a при изменении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 6 на основе экспериментальных данных. Рассмотр-

рены три серии испытаний железобетонных балок, проведенных профессором G. Kani (ACI). Все опытные образцы изготовлены без распределенного армирования, имеют ряд постоянных параметров, таких, как прочность бетона и продольной арматуры, процент продольного армирования. Образцы были разрушены по наклонному сечению. Изменяемыми факторами являются: высота балок ($h_0=13,5$ см в I серии, $h_0=27$ см во II серии, $h_0=54$ см в III серии) и расстояние от опоры до линии действия сосредоточенной нагрузки (анализировались балки со значением a от $1h_0$ до $6h_0$); ширина балок не менялась ($b=15,25$ см). Нагружение осуществлялось двумя симметрично расположенными сосредоточенными силами на расстояния a (пролет среза) от опорных площадок.

По СП 63.13330.2018 поперечная сила Q_b в наклонном сечении изгибаемого железобетонного элемента без распределенного армирования, воспринимаемая бетоном, определяется в зависимости от расчетного сопротивления бетона растяжению R_{bt} , рабочей высоты h_0 , ширины b и длины проекции наклонного сечения на ось балки c по эмпирической формуле

$$Q_b = \frac{1,5R_{bt}bh_0^2}{c}, \quad (1)$$

на которую накладывается ряд ограничений: $0,5R_{bt}bh_0 \leq Q_b \leq 1,5R_{bt}bh_0$; $h_0 \leq c \leq 2h_0$.

Установлено, что в ряде случаев (в балках без распределенного армирования при соотношении высоты балки к ее ширине 2:1 и 4:1) не обеспечивается прочность конструкции при $a/h_0 > 4$ (серия II) и при $a/h_0 > 2,5$ (серия III) (рис. 1, таблица). Более подробно анализ и синтез сложных многокритериальных систем представлены в [5–7].

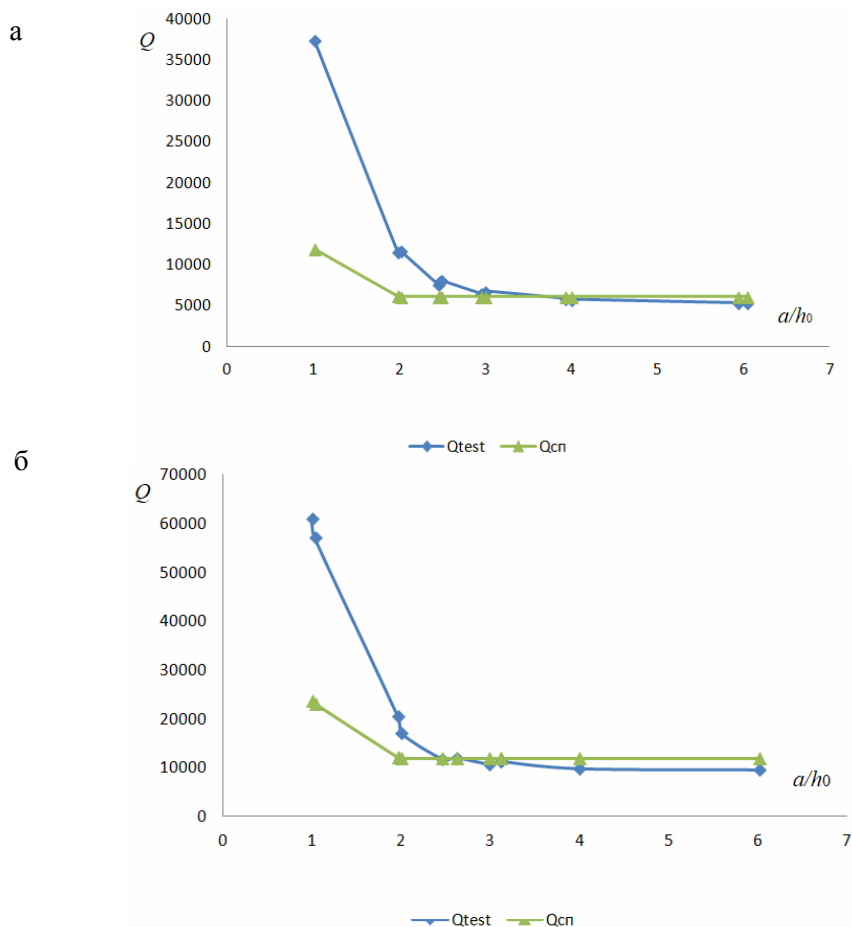


Рис. 1. Сопоставление опытных данных Q_{test} с зависимостью (1) (Q_{cn} , СП 63.13330.2018):
а – $h_0=27$ см; $h/b=2:1$; б – $h_0=54$ см; $h/b=3:1$

Опытные и расчетные величины

№ серии	a/h_0	Q_{test} (кг)	Q_{calc} (кг)	$Q_{сп}$ (кг)	Q_{test}/Q_{calc}	$Q_{test}/Q_{сп}$
I	1	16396,9	11309,94	5880,572	1,449778	2,788317
	1,03	16142,5	10925,48	5709,293	1,477509	2,827408
	2	7178,557	5026,377	2940,286	1,428177	2,441449
	2,04	6716,022	4911,259	2940,286	1,367475	2,284139
	2,41	5349,228	4041,106	2940,286	1,323704	1,819288
	2,67	5215,092	3584,61	2940,286	1,454856	1,773668
	2,94	4086,505	3202,534	2940,286	1,276022	1,389833
	3,02	3388,076	3103,502	2940,286	1,091694	1,152295
	3,44	3006,483	3055,793	2940,286	0,983863	1,022514
	3,46	2911,664	3052,783	2940,286	0,953774	0,990266
	3,95	3004,171	2984,815	2940,286	1,006485	1,021728
	5,09	2819,156	2858,886	2940,286	0,986103	0,958803
	5,12	2930,165	2856,032	2940,286	1,025957	0,996558
	5,3	3281,692	2839,305	2940,286	1,155808	1,116113
	5,35	3327,946	2834,776	2940,286	1,173971	1,131844
	5,92	3027,298	2786,405	2940,286	1,086453	1,029593
II	5,92	3140,619	2786,405	2940,286	1,127122	1,068134
	1,02	37396,03	20174,23	11831,55	1,853653	3,160705
	1,99	11494,02	9229,986	6064,412	1,245291	1,895323
	2,02	11632,78	9069,807	6034,09	1,282583	1,927843
	2,46	7562,462	7202,198	6034,09	1,050021	1,25329
	2,47	7932,491	7168,094	6034,09	1,106639	1,314613
	2,5	8024,998	7067,557	6034,09	1,13547	1,329943
	2,95	6498,63	5823,276	6034,09	1,115975	1,076986
	3	6753,024	5709,884	6034,09	1,18269	1,119145
	3,94	5851,079	5451,343	6034,09	1,073328	0,969671
	4,01	5758,572	5435,048	6034,09	1,059526	0,95434
	5,94	5319,163	5083,867	6034,09	1,046283	0,881519
III	6,05	5298,349	5068,034	6034,09	1,045445	0,878069
	1	60869,73	36198,55	23735,8	1,681552	2,56447
	1,03	56961,3	34968,06	23044,46	1,628952	2,4718
	1,96	20467,21	16472,2	12110,1	1,24253	1,690094
	2	16975,07	16087,41	11867,9	1,055177	1,430335
	2,46	11679,03	12626,91	11867,9	0,924932	0,984086
	2,62	11933,43	11729,48	11867,9	1,017388	1,005522
	2,99	10615,2	10049,76	11867,9	1,056264	0,894446
	3,11	11193,37	9597,574	11867,9	1,166271	0,943164
	3,11	11216,5	9597,574	11867,9	1,168681	0,945113
	4	9690,128	9532,782	11867,9	1,016506	0,816499
	6,02	9435,733	8892,799	11867,9	1,061053	0,795063

Сопоставление опытных данных с расчетными величинами (зависимость (1)) показывает, что при изменении a/h_0 от 1 до 3 наблюдается существенное превышение опытных величин над расчетными значениями: $Q_{test}/Q_{сп}=2,06$ (серия I); $Q_{test}/Q_{сп}=1,63$ (серия II); $Q_{test}/Q_{сп}=1,58$ (серия III). При изменении a/h_0 от 3 до 6 расчетные значения превосходят опытные величины в сериях II, III: $Q_{test}/Q_{сп}=0,96$ (серия II); $Q_{test}/Q_{сп}=0,88$ (серия III), т.е. расчетом не обеспечивается прочность конструкции по наклонному сечению (см. рис. 1, таблицу).

Как видим, расчетные значения (зависимость (1)) не отражают закономерности изменения опытных величин и требуют уточнения. Для установления функциональной зависимости прочности от геометрических характеристик a , h_0 и уточнения

нормативных методов расчета (по показателю длины проекции наклонного сечения c) проведена группировка экспериментальных данных по параметру пролета среза: первая группа – $1 \leq a/h_0 \leq 3$; вторая группа – $3 < a/h_0 \leq 6$. Особенности работы конструкций по параметру пролета среза рассмотрены в [8–10]. По исходным экспериментальным данным с помощью программной надстройки «Пакет анализа», «Регрессия» (Microsoft

Excel) получили линейную регрессию между $y = \ln \frac{Q}{bR_{bt}}$ и $x_1 = \ln h_0$, $x_2 = \ln a$. Ре-

зультаты регрессионной статистики представлены на рис. 2, 3. Рассчитанные коэффициенты регрессии позволяют получить уравнение, выражающее зависимость прочности железобетонных балок Q от высоты h_0 и пролета среза a .

Вывод ИТОГОВ								
Регрессионная статистика								
Множественный R	0,942243755							
R-квадрат	0,887823293							
Нормированный R-кв	0,877625411							
Стандартная ошибка	0,247252266							
Наблюдения	25							
Дисперсионный анализ								
	df	SS	MS	F	Значимость F			
Регрессия	2	10,64454473	5,32227236	87,05957329	3,5394E-11			
Остаток	22	1,344941028	0,06113368					
Итого	24	11,98948576						
Кoeffициенты стандартная ошибка статистика P-Значение Нижние 95% Верхние 95% Нижние 95,0% Верхние 95,0%								
Y-пересечение	1,768396557	0,298176845	5,93069713	5,72938E-06	1,150015632	2,38677748	1,15001563	2,38678
Переменная X 1	2,007198811	0,152120167	13,1948238	6,29054E-12	1,691720894	2,32267673	1,69172089	2,32268
Переменная X 2	-1,174100822	0,109641233	-10,70857	3,42467E-10	-1,40148282	-0,9467188	-1,4014828	-0,94672

Рис. 2. Результаты регрессионной статистики (первая группа, $1 \leq a/h_0 \leq 3$)

Вывод итогов					
Регрессионная статистика					
Множественный R	0,99217429				
R-квадрат	0,984409822				
Нормированный R-квадрат	0,982575684				
Стандартная ошибка	0,067413367				
Наблюдения	20				
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	4,878270092	2,439135046	536,7150881	4,3575E-16
Остаток	17	0,077257556	0,004544562		
Итого	19	4,955527648			
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%
Y-пересечение	0,439198184	0,140081572	3,135303082	0,006030283	0,1436519
Переменная X	1,021759706	0,057641016	17,72626125	2,12994E-12	0,90014779
Переменная X	-0,177867469	0,059244805	-3,002245853	0,008016219	-0,3028631
					Верхние 95%
					Нижние 95,0%
					Верхние 95,0%

Рис. 3. Результаты регрессионной статистики (вторая группа, $3 < a/h_0 \leq 6$)

Первая группа опытных образцов ($1 \leq a/h_0 \leq 3$) (рис. 2) дает:

$$y = 1,769 + 2,007x_1 - 1,174x_2. \quad (2)$$

Значение линейного коэффициента множественной корреляции $R=0,942$ говорит о высокой тесноте связи между результативным признаком и факторными переменными. Значение коэффициента детерминации показывает, что на 89 % вариация результативного признака y определяется вариацией факторных переменных (x_1 , x_2) в этой модели.

Вторая группа опытных образцов ($3 < a/h_0 \leq 6$) (рис. 3) дает:

$$y = 0,439 + 1,022x_1 - 0,178x_2. \quad (3)$$

Значение линейного коэффициента множественной корреляции $R=0,992$ говорит о высокой тесноте связи между результативным признаком и факторными переменными. Значение множественного коэффициента детерминации $R^2=0,984$ показывает, что около 98 % общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных переменных x_1, x_2 .

Значит, выбранные факторы (группы первая, вторая) влияют на прочность балок по наклонному сечению, что подтверждает правильность их включения в построенную модель.

Проверка значимости коэффициентов регрессии показывает, что абсолютные значения коэффициентов a_0, a_1, a_2 больше, чем их стандартные ошибки. К тому же эти коэффициенты являются значимыми, о чем можно судить по значениям показателя P -значения (меньше заданного уровня значимости $\alpha=0,05$).

Таким образом, расчетная модель определения прочности железобетонных балок при разрушении по наклонному сечению отражает влияние исследуемых факторов x_1, x_2 на результативный признак.

Преобразуем зависимость (2) в степенную функцию для уточнения совместного влияния факторов h_0, a при расчете изгибаемых элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы (первая группа, $1 \leq a/h_0 \leq 3$):

$$\ln \frac{Q}{bR_{bt}} = \ln e^{1,769} + \ln h_0^{2,007} + \ln a^{-1,174}; \quad (4)$$

$$Q = 5,86 \frac{R_{bt} b h_0^2}{a^{1,17}} \quad (5)$$

или

$$Q = 5,86 \frac{R_{bt} b h_0^2}{\gamma c}, \quad (6)$$

где c – длина проекции наклонного сечения ($c=a$ при $1 \leq a/h_0 \leq 3$); γ – коэффициент, учитывающий влияние пролета среза ($\gamma = a^{0,17}$).

Преобразуем зависимость (3) в степенную функцию для уточнения совместного влияния факторов h_0, a при расчете изгибаемых элементов по наклонному сечению на действие поперечной силы (вторая группа, $3 < a/h_0 \leq 6$). Получим:

$$\ln \frac{Q}{bR_{bt}} = \ln e^{0,44} + \ln h_0^{1,02} + \ln a^{-0,17}; \quad (7)$$

$$Q = 1,55 \frac{R_{bt} b h_0^{1,02}}{a^{0,17}} \quad (8)$$

или (в общем случае, с запасом прочности)

$$Q = 4,5 \frac{R_{bt} b h_0^2}{\gamma c}, \quad (9)$$

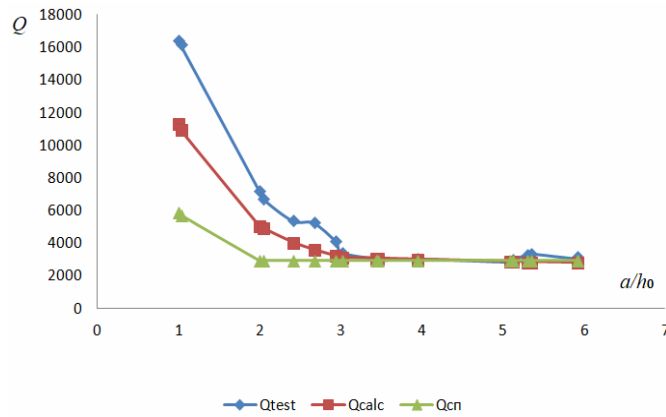
где c – длина проекции наклонного сечения ($c=3h_0$ при $3 < a/h_0 \leq 6$, $c=a$ при $1 \leq a/h_0 \leq 3$);

$$\gamma = a^{0,17}.$$

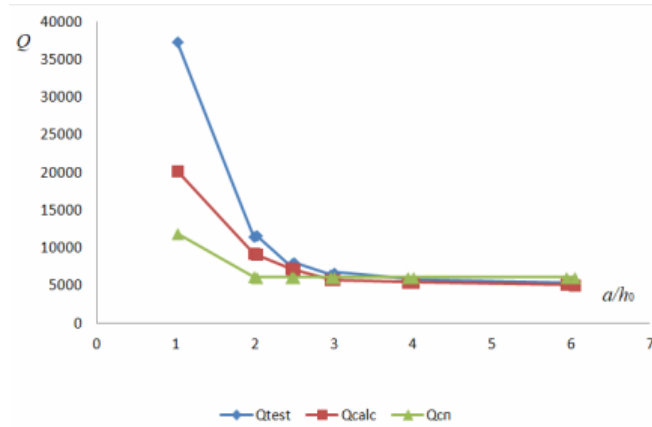
Таким образом, при введении дополнительного коэффициента γ , учитывающего влияние пролета среза, и уточнении длины проекции наклонного сечения ($c=a$, но не более $3h_0$) получена зависимость (9), учитывающая характер изменения опытных данных при изменении a/h_0 от 1 до 6. Полученное выражение позволяет количественно определить влияние каждого из рассматриваемых факторов на прочность железобе-

тонных балок Q в зоне действия поперечных сил. Экспериментальное подтверждение влияния совместного увеличения высоты балки и пролета среза на прочность балок в зоне действия поперечных сил (при изменении a/h_0 от 1 до 6) приведено на рис. 4 и в таблице.

а



б



в

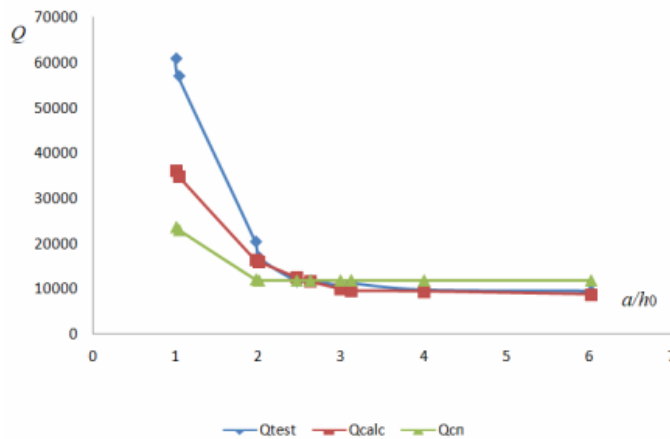


Рис. 4. Сопоставление опытных данных Q_{test} с зависимостями (1) $Q_{СП}$ и (9) Q_{calc} :
а – $h_0=13,5$ см; $h/b=1:1$; б – $h_0=27$ см; $h/b=2:1$; в – $h_0=54$ см; $h/b=4:1$

Заметим, что при $c=3h_0$ зависимость (9) согласуется с зависимостью (1):

$$Q_b = 4,5 \frac{R_{bt} b h_0^2}{\gamma c} = \frac{1,5 R_{bt} b h_0^2}{\gamma h_0}.$$

Выводы

1. Показано, что расчетные данные по определению прочности наклонного сечения железобетонных балок с относительным пролетом среза от 1 до 6 по СП 63.13330.2018 не отражают характера изменения опытных величин:

- при изменении a/h_0 от 1 до 3 наблюдается существенное превышение опытных величин над расчетными значениями: $Q_{test}/Q_{СП}=2,06$ (серия I, $h/b=1:1$); $Q_{test}/Q_{СП}=1,63$ (серия II, $h/b=2:1$); $Q_{test}/Q_{СП}=1,58$ (серия III, $h/b=4:1$);
- при изменении a/h_0 от 3 до 6 расчетные значения превосходят опытные величины в сериях II, III: $Q_{test}/Q_{СП}=0,96$ (серия II); $Q_{test}/Q_{СП}=0,88$ (серия III), т.е. расчетом не обеспечивается прочность конструкции по наклонному сечению.

2. Получено аналитическое выражение для определения прочности железобетонных балок без распределенного армирования при изменении относительного пролета среза от 1 до 6, учитывающее влияние геометрических характеристик конструкции, в том числе пролета среза. Значение линейного коэффициента множественной корреляции говорит о тесной связи между результативным признаком и факторными переменными. Значение множественного коэффициента детерминации показывает, что около 98 % общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных переменных при изменении a/h_0 от 3 до 6 и около 89 % – при изменении a/h_0 от 1 до 3.

3. Полученная зависимость определяет прочность железобетонных балок в зоне действия поперечных сил:

- при изменении a/h_0 от 1 до 3: $Q_{test}/Q=1,36$ (серия I, $h/b=1:1$); $Q_{test}/Q=1,25$ (серия II, $h/b=2:1$); $Q_{test}/Q=1,23$ (серия III, $h/b=4:1$);
- при изменении a/h_0 от 3 до 6: $Q_{test}/Q=1,06$ (серия I, $h/b=1:1$); $Q_{test}/Q=1,08$ (серия II, $h/b=2:1$); $Q_{test}/Q=1,09$ (серия III, $h/b=4:1$).

Список литературы

1. 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. 46–63.
2. Краснощеков, Ю.В. Расчетная модель сопротивления поперечной силе железобетонных изгибаемых элементов // Вестник СИБАДИ. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 182–192.
3. Кодыш, Э.Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №6. – С.25–28.
4. Филатов, В.Б. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил / В.Б.Филатов, А.С. Арцыбасов, М.А. Багаутдинов, Д.И. Гордеев, А.И. Картунов, Р.А. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 642–645.
5. Гарькина, И.А. Проектирование и оптимизация свойств сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 5–11.
6. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>
7. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32
8. Снежкина, О.В. Оценка методов расчета прочности железобетонных балок на действие поперечных сил / О.В. Снежкина, А.В. Корнюхин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 127–134.

9. Снежкина, О.В. Железобетонные балки в зоне действия поперечных сил / О.В. Снежкина, С.А. Толушов // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 126–133.

10. Снежкина, О.В. Прочность наклонного сечения изгибаемого железобетонного элемента / О.В. Снежкина, А.И. Шейн, К.М. Стешин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 4 (53). – С. 59–65.

References

1. Krylov, S.B. Model of the strength 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. – 4(27). – P.46–63.

2. Krasnoshchekov, Yu.V. Calculation model of resistance to lateral force of reinforced concrete bending elements // SIBADI Bulletin. – 2019. – Vol. 16, No. 2. – P. 182–192.

3. Kodysh, E.N. Improving the regulatory framework for the design of reinforced concrete structures / E.N. Kodysh, N.N. Trekin // Industrial and civil construction. – 2016. – No. 6. – P. 25–28.

4. Filatov, V.B. Analysis of design models when calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams under the action of transverse forces / V.B. Filatov, A.S. Artsybasov, M.A. Bagautdinov, D.I. Gordeev, A.I. Kortunov, R.A. Nikitin // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, No.4(3). – P. 642–645.

5. Garkina, I.A. Design and optimization of the properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – No. 4 (37). – P. 5–11.

6. Garkina, I. Modeling of building materials as complex systems / I. Garkina, A. Danilov, Yu. Skachkov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 730. – P. 412–417. – URL: <https://www.scientific.net/KEM.730.412>

7. Garkina, I. Analytical design of composites in terms of systems analysis / I. Garkina, A. Danilov // Architecture and Engineering. – 2023. – № 2 (8). – P. 25–32. – DOI: 10.23968/2500-0055-2023-8-2-25-32

8. Snezhkina, O.V. Evaluation of methods for calculating the strength of reinforced concrete beams under the action of transverse forces / O.V. Snezhkina, A.V. Kornukhin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No. 4 (57). – P. 127–134.

9. Snezhkina, O.V. Reinforced concrete beams in the zone of action of transverse forces / O.V. Snezhkina, S.A. Tolushov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 3 (52). – P. 126–133.

10. Snezhkina, O.V. Strength of the inclined section of a bendable reinforced concrete element / O.V. Snezhkina, A.I. Shein, K.M. Steshin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 4 (53). – P. 59–65.

УДК 624.137.5

DOI 10.54734/20722958_2024_4_156

Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет

Россия, 614990, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29

Чмых Никита Вячеславович,
ассистент кафедры «Автомобильные
дороги и мосты»
E-mail: chmyhnikita@gmail.com

Третьякова Ольга Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Строительный инжиниринг и
материаловедение», доцент кафедры
«Автомобильные дороги и мосты»
E-mail: olga_wsw@mail.ru

Perm National Research Polytechnic
University

Russia, 614990, Perm, 29, Komsomolsky ave.

Chmykh Nikita Viacheslavovich,
Assistant of the Department «Roads and
Bridges»
E-mail: chmyhnikita@gmail.com

Tretiakova Olga Viktorovna,
Candidate of Sciences, Associate Professor of
the Department «Civil Engineering and
Material Science», Associate Professor of the
Department «Roads and Bridges»
E-mail: olga_wsw@mail.ru

СНИЖЕНИЕ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН: РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Н.В. Чмых, О.В. Третьякова

Рассматриваются методы снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен. Однако технологичность таких методов различна. Поэтому целью данного исследования является выявление наиболее рациональных из них на основе российского и зарубежного опыта. Проведенные обзор и оценка показали, что наибольший интерес представляет снижение сил пучения за счет рациональной конфигурации конструкций. Это позволяет обеспечить эксплуатационную пригодность подпорных стен на протяжении всего срока службы, в то время как другие методы имеют ограничения. Долговечность сооружения, обеспеченная за счет его конфигурации, будет выше, чем та, что достигается посредством дополнительных элементов и мероприятий.

Ключевые слова: подпорные стены, морозное пучение, рациональные конструкции, срок службы, долговечность

REDUCTION OF THE FROST HEAVE EFFECT ON RETAINING WALLS: RATIONAL DESIGN

N.V. Chmykh, O.V. Tretiakova

The article considers the methods of reducing frost heave forces on the surface of retaining walls. However, the technological feasibility of such methods is different. Therefore, the purpose of this study is to identify the most rational of them based on Russian and foreign experience. The review and evaluation has shown that the greatest interest is in the reduction of frost heave forces through rational configuration of structures. This allows ensuring the serviceability of retaining walls throughout their service life, while other methods have limitations. The durability of the structure ensured by its configuration will be higher than that achieved by additional elements and measures.

Keywords: retaining wall, frost heave, rational design, service life, durability

1. Введение

Сезонное промерзание и морозное пучение грунтов оказывает существенное влияние на эксплуатационное состояние подпорных стен в районах с суровым климатом. В зимний период происходит распространение отрицательной температуры со стороны засыпки и через тело сооружения. Это приводит к развитию напряжений и сил морозного пучения грунта на поверхности стены.

Горизонтальное давление морозного пучения исследовалось многими учеными. Алексеев А.Г. и Changjian T. [1–2] зафиксировали максимальную величину давления морозного пучения на подпорную стену – 0,25 МПа и 0,4–0,42 МПа соответственно. Они отмечали, что одновременное действие активного давления грунта и морозного пучения может существенно повлиять на устойчивость подпорной стены и вызвать недопустимые деформации, а также отказ конструкции. Славин Б.Е. [3] обозначил нормальные напряжения морозного пучения, действующие на обделку тоннелей Восточно-Сибирской железной дороги: 185, 322 и 350 кН/м² на разных участках.

В практике проектирования и строительства применяются различные методы для снижения негативного влияния сил морозного пучения грунта. Такие методы можно условно разделить на две группы [4]. Первая группа – это проектирование рациональных конструкций, в том числе за счет изменения конфигурации стены. Вторая группа методов предусматривает использование дополнительных элементов и мероприятий. Целью данного исследования является оценка методов снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен.

2. Методы снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стены

Как было указано выше, снижение сил морозного пучения обеспечивается за счет изменения конфигурации стен, а также за счет дополнительных элементов и мероприятий.

2.1. Изменение конфигурации стен

Выбор эффективной морозоустойчивой конструкции на этапе проектирования позволяет добиться требуемого уровня надежности без применения дополнительных затрат. Рациональное проектирование подпорных стен обеспечивает их безотказную работу в условиях сезонного промерзания и морозного пучения, что приводит к снижению затрат на строительство. Такие исследования проводили российские и зарубежные авторы.

Цимбельман Н.Я. и Эстрин Л.З. [5] предложили конструкцию подпорной стены из сборных блоков с лицевыми гранями в одной плоскости, как показано на рис. 1. Авторы утверждают, что такое решение повышает устойчивость стены за счет смещения центра тяжести в сторону засыпки. Благодаря этому стена, отклонившаяся от вертикали, возвращается в исходное положение после оттаивания.

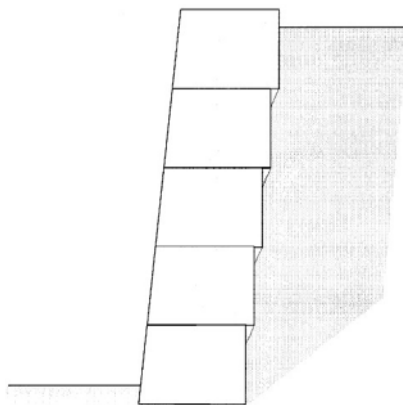


Рис. 1. Конструкция подпорной стены из сборных блоков [5]

Берштейн В.Е. [6] предложил морозозащитную конструкцию устоев «моста тоннельного типа». Устои выполнены в виде подпорных стен и снабжены защитным экраном. По мнению автора патента, такая конструкция позволяет исключить проникновение пучинистого грунта под подпорную стену и не допустить возникновения нормальных сил пучения под подошвой стены (рис. 2а). В дальнейшем Асмолов В.А. [7] разработал более эффективный вариант подобных устоев за счет снижения их материалоемкости. Для этого он закрепил защитный экран тягой к подпорной стене (рис. 2,б).

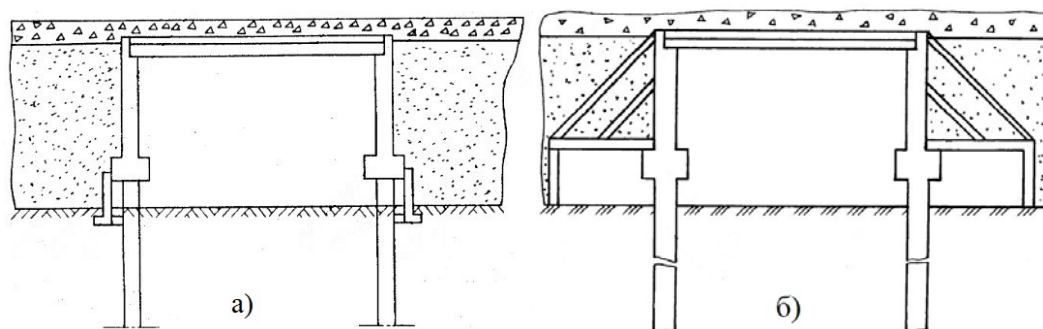


Рис. 2. Мост тоннельного типа с устоями в виде подпорных стен и защитными экранами:
а – с защитными экранами; б – с защитными экранами и тягой [6–7]

Ранее авторы данной статьи рассмотрели вопрос рационального использования материала анкерных свай в тонких шпунтовых подпорных стенах, работающих в условиях морозного пучения [8]. На основании расчета, выполненного методом конечных элементов, в верхней части сваи получены значительные изгибающие моменты, в то время как в нижней части сваи усилия меньше. Повышение несущей способности сваи достигается изменением конфигурации. Верхняя часть сваи имеет сечение с наибольшим размером, а нижняя часть – с наибольшим горизонтальным размером. Такая конфигурация позволяет достигнуть удерживающего эффекта, что особенно эффективно в условиях морозного пучения.

Еще одним конструктивным приемом, позволяющим снизить силовое влияние морозного пучения, является уменьшение расчетной длины стены с помощью закрепления анкерами различных видов. Такое решение приводит к уменьшению гибкости стены и предотвращает потерю устойчивости формы сооружения.

2.2. Дополнительные элементы и мероприятия

К таким методам относятся: замена грунта засыпки, снижение влагосодержания в грунте, обработка грунта химическими реагентами, обмазка, теплоизоляция. Также возможно применение геосинтетических материалов при проектировании и в процессе эксплуатации.

Замена грунта засыпки является одним из наиболее действенных способов снижения воздействия морозного пучения на подпорные стены. Следует отметить, что в соответствии с СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования» обратная засыпка устраивается из дренирующего грунта. Для этого используются непучинистый или слабопучинистый песчаный или крупнообломочный грунт.

Самарин В.Ф. и Козловский О.Г. [9] проанализировали влияние морозного пучения на вертикальную железобетонную шпунтовую подпорную стену Канала им. Москвы. Деформации конструкции произошли из-за невыполнения проектного решения по замене глинистого грунта на песчаный. Использование в качестве грунта засыпки дренирующего материала с непучинистыми свойствами заложено в проекте контрфорсной подпорной стены шлюза № 10 Канала им. Москвы [10]. В данном проекте было предусмотрено устройство песчаного слоя толщиной 70 см, которая составляет $2/3$ от глубины промерзания засыпки.

Грунт обратной засыпки характеризуется определенными теплофизическими свойствами [11]. При этом учитываются: теплопроводность, теплоемкость, температура начала промерзания, температуропроводность, коэффициенты объемного расширения и морозоустойчивость грунта. Использование грунта с меньшей теплопроводностью позволяет снизить глубину промерзания. Такой подход целесообразно применять в комплексе с другими мероприятиями.

Для **гидромелиорации** используют дренажные конструкции или пристенные дренажи, которые снижают уровень грунтовых вод и предотвращают переувлажнение от поверхностных вод.

Woo HJ. и Go GH. [12] выполнили численный анализ морозного пучения грунта засыпки в программном комплексе ABAQUS с различным уровнем грунтовых вод (УГВ). Авторы рассмотрели 3 случая для оценки влияния УГВ на процессы промерзания и пучения грунта. В первых двух случаях в конструкции не был заложен пристенный дренаж, в третьем случае с внутренней стороны стены была предусмотрена засыпка из дренирующего материала. Схемы конструкций представлены на рис. 3. Результаты численного анализа показали, что горизонтальное давление морозного пучения оказывает наибольшее влияние на устойчивость подпорной стены, поэтому на стадии проектирования следует предусматривать мероприятия по его снижению. Как показал случай 2, это не всегда достигается за счет снижения УГВ. Сравнивая случаи 2 и 3, авторы отметили, что в случае 3 интенсивность напряжений по критерию Мизеса существенно сократилась (1/7 от напряжений по Мизесу в случае 2). Также в случае 3 дренирующий материал позволил увеличить УГВ. Следовательно, при устройстве пристенного дренажа снижается горизонтальное давление морозного пучения на подпорную стену.

Геосинтетические материалы также могут выполнять функцию дренирования. Han J. и Jiang Y. [13] предложили геосинтетический материал для повышения эксплуатационной надежности подпорных стен, работающих в условиях сурового климата.

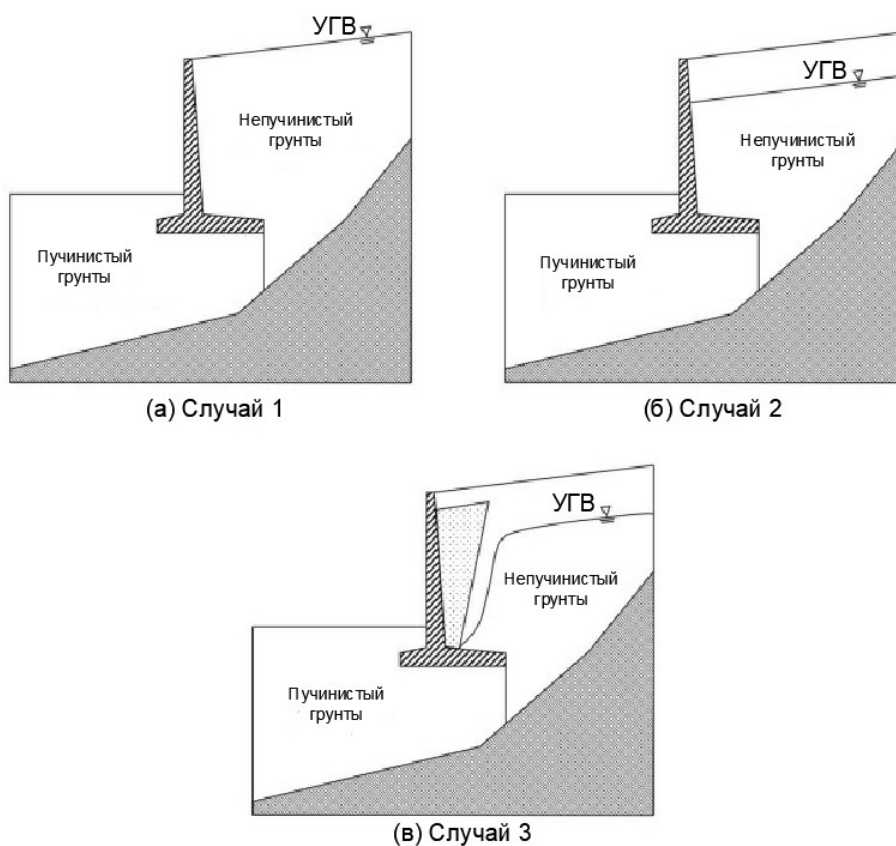


Рис. 3. Схемы подпорных стен с различным уровнем грунтовых вод и пристенным дренажом [12]

Гидрофобизацию и засоление грунта относят к физико-химическим методам, которые направлены на предотвращение или уменьшение деформаций морозного пучения путем изменения физико-химического состава грунтов. Такие методы сложны в реализации и имеют ряд недостатков, основным из которых является непродолжительный срок службы (не более 7 лет) [14].

Обмазка поверхностей конструкций, подверженных влиянию морозного пучения, преимущественно осуществляется материалами на основе битума. Обмазка позволяет исключить непосредственный контакт мерзлого грунта с конструкцией и снизить действие касательных сил морозного пучения. Однако, по последним исследованиям,

битумные материалы в грунте подвержены микробиологической коррозии, что приводит к полному разрушению защитного покрытия [15]. Кроме того, данный метод неэффективен для подпорных стен, т.к. основное воздействие оказывают нормальные силы морозного пучения.

Тепловая мелиорация предусматривает создание в грунте слоя теплоизоляции, который позволяет снизить глубину промерзания грунта засыпки за счет использования материала с низкой теплопроводностью. Применительно к подпорным стенам теплоизоляцию устраивают у внешней или внутренней поверхности стены [16].

В Хоккайдо (Япония) применили в качестве теплоизоляционного материала гранулированный пенополистирол и стеклянную крошку, помещенные в специальные мешки [17]. Это предотвращает промерзание и подъем влаги к фронту промерзания. Конструкции подпорных стен с теплоизоляцией в виде мешков представлены на рис. 4. Авторы этого метода сравнили отклонение стен от вертикального положения. Без использования специальных мероприятий отклонение составило $3,7^\circ$, с применением гранулированного пенополистирола – $1,4^\circ$, со стеклянной крошкой – $1,1^\circ$. В случае использования пенополистирола горизонтальное смещение составило 2,1 см, стеклянной крошки – 3,0 см.

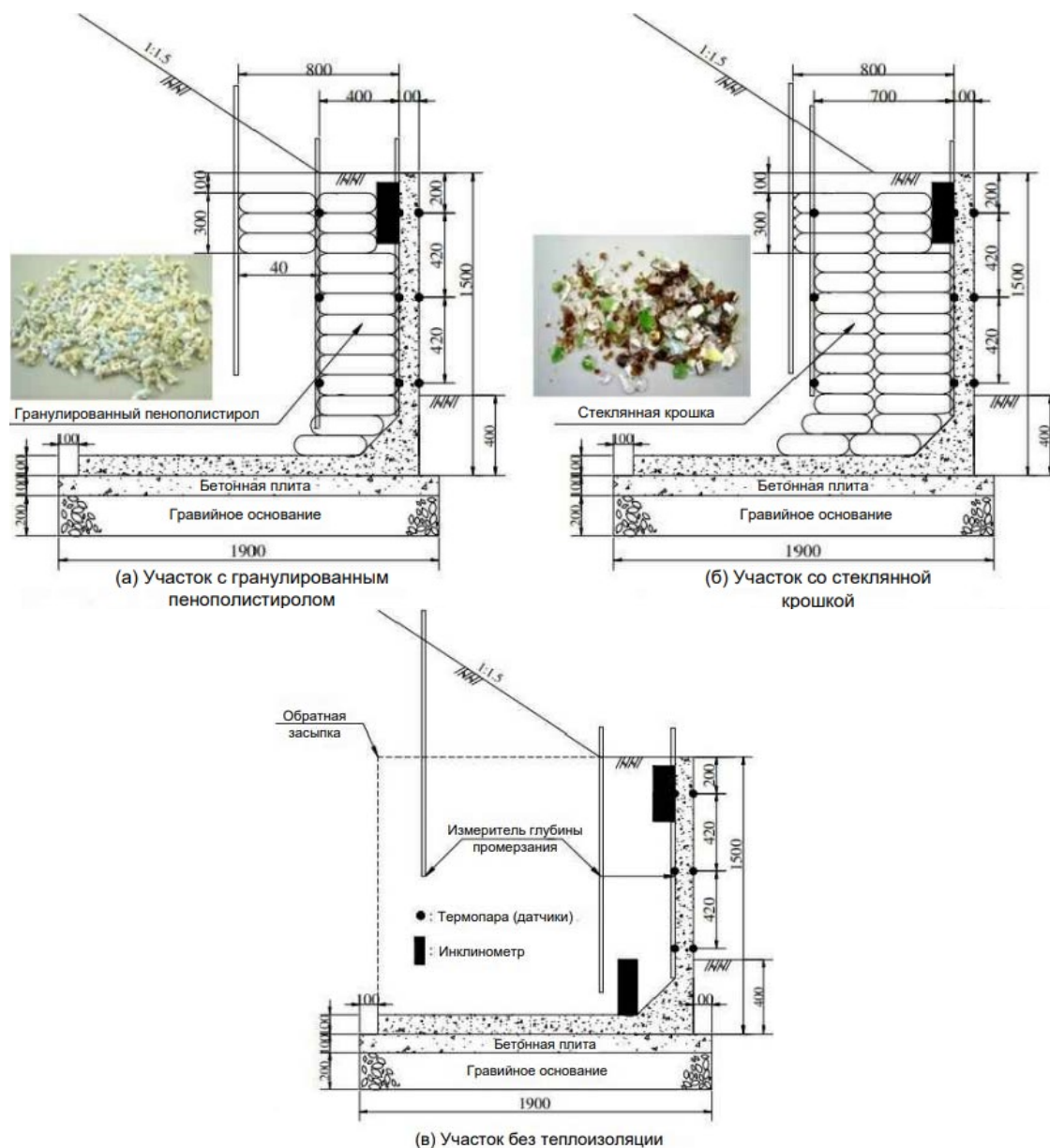


Рис. 4. Подпорные стены с теплоизоляцией в виде мешков [17]

В округе Самерсет штата Мэн (США) была построена подпорная стена с грунтовыми нагелями [18]. Для снижения воздействия морозного пучения на лицевой стороне стены устроена теплоизоляция из экструдированного пенополистирола в два слоя по 3 см. Для анализа эффективности принятых мер по снижению сил морозного пучения производился мониторинг на протяжении трех лет (с 1997 г. по 2000 г.). С помощью теплоизоляции удалось добиться положительного эффекта.

3. Оценка методов

В статье рассмотрены методы снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен. Однако технологичность и долговечность таких методов различна, как показано авторами в таблице.

Оценка методов снижения сил морозного пучения на подпорные стены

№ п/п	Наименование метода	Критерии оценки		
		Технологичность*	Долговечность	Эффективность
1	Рациональные конструкции	Нет	Соответствует сроку службы сооружения	Эффективны
2	Замена грунта	Нет	Меньше срока службы сооружения ^а	Со временем снижается ^а
3	Гидромелиорация	Нет	Соответствует сроку службы сооружения при соответствующем уровне содержания	Эффективны при соответствующем уровне содержания
4	Гидрофобизация и засоление	Да	Меньше срока службы сооружения ^б	Низкая эффективность ^б
5	Обмазка	Да	Меньше срока службы сооружения ^в	Низкая эффективность ^в
6	Тепловая мелиорация	Да	Меньше срока службы сооружения ^г	Эффективны при своевременной замене утеплителя

* по потребности в дополнительных элементах и мероприятиях («да» – требуются мероприятия; «нет» – не требуются дополнительные мероприятия);

^а – не обладает достаточной долговечностью, т.к. замененный грунт со временем вновь заносится пучинистыми глинистыми частицами;

^б – срок эксплуатации не более 7 лет;

^в – подвержены микробиологической коррозии;

^г – имеют ограниченный срок (меньше, чем у железобетона) эксплуатации и со временем требуют замены.

Результаты исследования (см. таблицу) показали, что изменение конфигурации стен, предусмотренное на стадии проектирования, позволяет обеспечивать снижение сил пучения весь срок эксплуатации сооружения. Технологичность таких решений заключается в том, что они не требуют дополнительных элементов и мероприятий.

4. Выводы

Проведенный обзор и оценка привели к следующим выводам.

1. В практике проектирования и строительства методы снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен разделяются на две группы.

2. К первой группе относятся рациональные конструкции стен, полученные за счет изменения конфигурации, а также уменьшения расчетной длины элементов. Вторая группа методов предполагает дополнительные элементы и меры, в том числе замену грунта, гидромелиорацию, гидрофобизацию и засоление, обмазку поверхности стены и тепловую мелиорацию.

3. По результатам оценки определено, что методы различаются по технологичности. Наибольший интерес представляет рациональное проектирование, основанное

на изменении конфигурации стен. Это обеспечивает механическую безопасность конструкций и не требует эксплуатационных мероприятий.

Таким образом, в работе дана оценка существующих методов снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен. Изменение конфигурации является тем превентивным методом, который позволит выполнить это с минимальными затратами. Долговечность сооружения, обеспеченная за счет его конфигурации, будет выше, чем та, что достигается посредством дополнительных элементов и мероприятий.

Направлением дальнейших исследований является развитие превентивных методов снижения сил морозного пучения на поверхности подпорных стен за счет изменения конфигурации.

Список литературы

1. Алексеев, А.Г. Определение горизонтального давления грунта на подпорные стены при сезонном промерзании-оттаивании: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.08 / А.Г. Алексеев; ОАО «ПНИИИС». – М., 2006. – 190 с.
2. Changjian, T. Horizontal Frost Heave Thrust Action Buttress Constructions / T. Changjian, S. Zongyan // *Engineering Geology*. – 1981. – Vol. 18. – P 259–268.
3. Тоннели. Справочно-методическое пособие в помощь строителям БАМа / под ред. Д.И. Федорова. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.
4. Третьякова, О.В. Влияние сурового климата на транспортные сооружения и методы их защиты / О.В. Третьякова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2018. – № 3(31). – С. 95–107. – DOI 10.15593/2409-5125/2018.03.08.
5. Патент на полезную модель № 85502 U1 Российская Федерация, МПК E02D 29/02. Подпорная стенка: № 2009104484/22 : заявл. 10.02.2009 : опубл. 10.08.2009 / Н.Я. Цимбельман, Л.З. Эстрин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный технический университет» (ДВПИ им. В.В. Куйбышева).
6. Патент на изобретение № SU 949038 СССР, МПК E01D 19/02. Мост тоннельного типа : № 2984424/29-33 : заявл. 10.09.80 : опубл. 07.08.80 / В.Е. Берштейн.
7. Патент на изобретение № RU 2012706 C1 Российская федерация, МПК E01D 19/02. Мост тоннельного типа: № 5021260/33: заявл. 09.01.1992: опубл. 15.05.1994 / В.А. Асмолов; заявитель Тындинская мерзлотная станция Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства.
8. Юшков, Б.С. Рациональное использование материала анкерных свай тонких подпорных стен / Б.С. Юшков, О.В. Третьякова // *Транспортные сооружения*. – 2015. – Т. 2, № 2(6). – С. 1–9.
9. Самарин, В.Ф. Влияние морозного пучения на вертикальные подпорные стенки / В.Ф. Самарин, О.Г. Козловский // *Речной транспорт (XXI век)*. – 2009. – № 7(43). – С. 84–86.
10. Максименко, Е.В. Воздействие морозного пучения грунта на подпорные стены гидротехнических сооружений / Е.В. Максименко, С.Н. Левачев // *Вестник МГСУ*. – 2010. – № 4–2. – С. 331–338.
11. Каменских, Е.М. Пример силового воздействия морозного пучения грунтов на ограждение котлована под свайные фундаменты копра скипового ствола / Е.М. Каменских, Б.С. Юшков // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. – 2014. – Т. 1. – С. 417–420.
12. Woo, HJ. Mechanical behavior assessment of retaining wall structure due to frost heave of frozen ground / HJ. Woo, GH. Go // *International Journal of Geo-Engineering*. – 2024. – Vol. 15, No. 7. – P. 1–16. – DOI:10.1186/s40703-024-00210-8.
13. Han J., Jiang Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions / J. Han, Y. Jiang // *Sciences in Cold and Arid Regions*. – 2013. – Vol. 5 (5). – P. 517–529. – DOI: 10.3724/SP.J.1226.2013.00517.

14. Способы борьбы с морозным пучением сезоннопромерзающих грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений / Д.С. Скворцов, А.Н. Краев, А.Н. Краев, Е.А. Жайсамбаев // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 68–79.
15. Пронькин, С.П. Стойкость битумных материалов в условиях воздействия почвенных микроорганизмов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / С.П. Пронькин; Пензен. гос. ун-т архитектуры и строительства. – Пенза, 2006. – 19 с.
16. Алексеев, А.Г. Применение теплоизоляции ПЕНОПЛЭКС® для снижения сил морозного пучения грунта за подпорными стенами / А.Г. Алексеев, А.И. Бек-Булатов // Строительные материалы. – 2007. – № 6. – С. 58–59.
17. Rui, D. Full-Scale Model Test on Prevention of Frost Heave of L-Type Retaining Wall / D. Rui, H. Deng, D. Nakamura, S. Yamashita, T. Suzuki, H. Zhao // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 132. – P. 89–104.
18. Sandford, T. Effect of Insulation on the Performance of a Soil-Nailed Wall in Frost Susceptible Conditions / T. Sandford, D. Kingsbury, D. Humphrey // Conference: 13th International Conference on Cold Regions Engineering. – 2006. – P. 1–10. – DOI:10.1061/40836(210)25.

References

1. Alekseev, A.G. Determination of horizontal soil pressure on retaining walls under seasonal freezing-thawing conditions. Ph. D. degree thesis / A.G. Alekseev. – M., 2006. – 190 p.
2. Changjian, T. Horizontal Frost Heave Thrust Action Buttress Constructions / T. Changjian, S. Zongyan // Engineering Geology. – 1981. – Vol. 18. – P 259–268.
3. Fedorov, D.I. Tunnels. Reference and methodological manual to assist BAM builders / D.I. Fedorov. – M.: Transport, 1979. – 176 p.
4. Tretiakova, O.V. Impact of harsh climate on transportation structures and methods of their protection / O.V. Tretiakova // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics. – 2018. – No. 3(31). – P. 95–107. – DOI: 10.15593/2409-5125/2018.03.08.
5. Utility Model Patent No. 85502 U1 Russian Federation, IPC E02D 29/02. Retaining wall: No. 2009104484/22 : application 10.02.2009 : publ. 10.08.2009 / N.Ya. Tsymbelman, L.Z. Estrin; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education "Far Eastern State Technical University" (DVPI named after V.V. Kuibyshev).
6. Patent for invention No. SU 949038 of the USSR, IPC E01D 19/02. Tunnel type bridge : No. 2984424/29-33 : application 10.09.80 : publ. 07.08.80 / V.E. Berstein.
7. Patent for invention No. RU 2012706 C1 Russian Federation, IPC E01D 19/02. Tunnel type bridge: No. 5021260/33: application 09.01.1992: publ. 05/15/1994 / V.A. Asmolov; applicant Tynda permafrost station of the All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction.
8. Yushkov, B.S. Rational use of the material of anchor piles of thin retaining walls / B.S. Yushkov, O.V. Tretyakova // Transport structures. – 2015. – Vol. 2, No. 2(6). – P. 1–9.
9. Samarin, V.F. The influence of frost heaving on vertical retaining walls / V.F. Samarin, O.G. Kozlovsky // River transport (XXI century). – 2009. – № 7(43). – P. 84–86.
10. Maksimenko, E.V. The effect of frost heaving of soil on retaining walls of hydraulic structures / E.V. Maksimenko, S.N. Levachev // Vestnik MGSU. – 2010. – № 4–2. – P. 331–338.
11. Kamenskikh, E.M. An example of the forceful effect of frosty heaving of soils on the fencing of a pit for pile foundations of a skip trunk copra / E.M. Kamenskikh, B.S. Yushkov // Modernization and scientific research in the transport complex. – 2014. – Vol. 1. – P. 417–420.
12. Woo, HJ. Mechanical behavior assessment of retaining wall structure due to frost heave of frozen ground / HJ. Woo, GH. Go // International Journal of Geo-Engineering. – 2024. – Vol. 15, No. 7. – P. 1–16. – DOI:10.1186/s40703-024-00210-8.
13. Han J., Jiang Y. Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions / J. Han, Y. Jiang // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2013. – Vol. 5 (5). – P. 517–529. – DOI: 10.3724/SP.J.1226.2013.00517.

14. Methods of combating frost heaving of seasonally freezing soils in the foundations of foundations of buildings and structures / D.S. Skvortsov, A.N. Kraev, A.N. Kraev, E.A. Zhaisambayev // Bulletin of Eurasian Science. – 2019. – Vol. 11, No. 5. – P. 68–79.
15. Pronkin, S.P. Resistance of bitumen materials under the influence of soil microorganisms: abstract. of dis. ... candidate of Sciences: 05.23.05 / S.P. Pronkin; Penza State University of Architecture and Construction. – Penza, 2006. – 19 p.
16. Alekseev, A.G. The use of PENOPLEX® thermal insulation to reduce the forces of frost heaving of soil behind retaining walls / A.G. Alekseev, A.I. Bek-Bulatov // Building materials. – 2007. – No. 6. – P. 58–59.
17. Rui, D. Full-Scale Model Test on Prevention of Frost Heave of L-Type Retaining Wall / D. Rui, H. Deng, D. Nakamura, S. Yamashita, T. Suzuki, H. Zhao // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 132. – P. 89–104.
18. Sandford, T. Effect of Insulation on the Performance of a Soil-Nailed Wall in Frost Susceptible Conditions / T. Sandford, D. Kingsbury, D. Humphrey // Conference: 13th International Conference on Cold Regions Engineering. – 2006. – P. 1–10. – DOI:10.1061/40836(210)25.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства

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

Шеин Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор
E-mail: shein-ai@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

Shein Aleksandr Ivanovich,
Doctor of Sciences, Professor
E-mail: shein-ai@yandex.ru

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – РЕАКТИВНЫЙ ГАСИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

А.И. Шеин

Приводятся вывод и решения дифференциального уравнения движения механической системы при кинематическом возбуждении колебаний и работе реактивного гасителя. Полагается, что кинематические воздействия вызываются природными колебаниями поверхности земли. Уравнения записываются из условия, что реактивный гаситель работает постоянно, меняя направление импульса в зависимости от знака скорости движения узла его установки. Даются решения системы дифференциальных уравнений движения при возмущениях гармонического характера и после снятия возмущающей нагрузки. Представленные преобразования помогают более четко моделировать задачу по гашению колебаний

Ключевые слова: сейсмическая защита, дифференциальные уравнения движения, колебания, сейсмограмма, реактивный гаситель

DIFFERENTIAL EQUATIONS OF MOTION OF THE «STRUCTURE – REACTIVE VIBRATION DAMPENER» SYSTEM UNDER SEISMIC DISTURBANCES

A.I. Shein

The article presents conclusions and solutions of the differential equation of motion of a mechanical system at kinematic excitation of vibrations and operation of a reactive damper. It is believed that kinematic effects are caused by natural fluctuations of the earth's surface. The equations are written from the condition that the jet extinguisher works constantly, changing the direction of the pulse depending on the sign of the speed of movement of the unit of its installation. The solution of the system of differential equations of motion is given for harmonic perturbation and after removal of the disturbing load. The presented transformations help to model the vibration damping task more clearly.

Keywords: seismic protection, differential equations of motion, oscillations, seismogram, reactive damper

В работах Коренева Б.Г. и Блехермана [1], Дукарта А.В. и Олейника А.И. [2], Кореновой Е.Б. [3], Остроумова Б.В. [4] рассматриваются проблемы гашения колебаний высотных сооружений.

В работах [5...10] анализировалась работа реактивных гасителей при сейсмических нагрузках. При этом для решения исходных систем уравнений движения применялись прямые шаговые методы. В настоящем исследовании разбирается методика построения, упрощения, а также аналитического и численного решений системы дифференциальных уравнений движения при кинематическом возбуждении колебаний.

Рассмотрим математическую модель «сооружение – гаситель» в условиях возмущающих воздействий сейсмического характера. Будем полагать, что упругие характеристики сооружения определяются матрицей жесткости K , а инерционные свойства – диагональной (узловой) матрицей масс M . Гаситель должен создавать знакопеременные импульсы

$$S_i = R_i \cdot \Delta t, \quad (1)$$

препятствующие колебательным движениям здания или сооружения. Основной составляющей управляющего импульса будет реактивная сила газовой струи, вырывающейся из сопла гасителя под высоким давлением. Реактивная сила от сгорающего топлива определяется известным соотношением:

$$R_i = V_e \cdot \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

Здесь V_e – скорость выбрасывания газовой струи; $\dot{m}$ – скорость расходования массы топлива.

Возмущающее воздействие на механическую систему будем создавать движением опорных узлов согласно сейсмограмме землетрясения, т.е. с помощью кинематического возмущения (рис. 1).

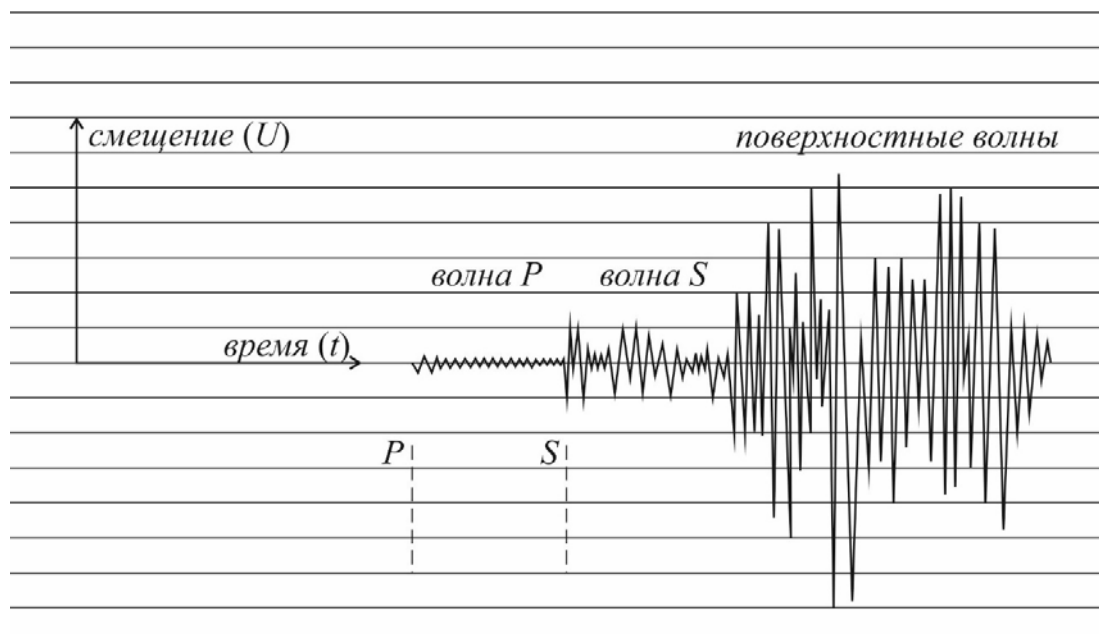


Рис. 1. Сейсмограмма землетрясения вдоль одной из геометрических осей

Для узла сооружения с присоединенным реактивным гасителем уравнение движения МКЭ примет вид:

$$(M_i + m_i) \ddot{u}_i + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_j = P_i \mp v_e \cdot \dot{m}_i, \quad (3)$$

где m_i – переменная масса реактивного гасителя.

При этом матрицы масс и вектор внешних нагрузок имеют вид

$$M = \text{diag} [M_1 \ M_2 \ \dots \ M_i + m_{i,t+\Delta t} \ \dots \ M_n], \quad (4)$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_i \mp V_e (m_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}) / (\Delta t) \ \dots \ P_n]^T. \quad (5)$$

Основными характеристиками реактивного гасителя, обеспечивающими эффективное гашение колебаний, являются:

- местоположение на сооружении;
- скорость выбрасывания реактивной струи V_e^{gas} , м/с;
- скорость изменения массы горючей жидкости $\dot{m}$;
- время выбрасывания реактивной струи за одно включение T^{gas} , м/с;
- величина предельно допустимого относительного отклонения точек защищаемой механической системы δ_{max} , м.

Будем рассматривать гаситель как блок из двух противоположно направленных реактивных батарей. Гаситель либо включается в работу в случае, когда контролируемое относительное перемещение какого-либо узла достигает значения δ_{max} , либо работает постоянно, меняя направление импульса в зависимости от знака скорости. Т.е. направление реактивной силы гасителя определяется направлением вектора относительной скорости контрольного узла и противоположно ему.

Примем скорость истечения газов из сопла гасителя постоянной:

$$V_e^{gas} = \text{const}, \quad (6)$$

а закон изменения массы горючей жидкости в виде убывающей функции:

$$m = m_0(1 - \beta t). \quad (7)$$

Здесь β – коэффициент размерностью с^{-1} .

В этом случае произведение $V_e^{gas} \cdot \dot{m}_i$ будет константой, а уравнение (3) можно переписать относительно новой системы координат – положения равновесия механической системы, определяемого вектором статической нагрузки P_i . Отсчитывая перемещения w_i от этого положения, получаем дифференциальное уравнение равновесия в виде:

$$(M_i + m_i)\ddot{w}_i + \sum_{j=1}^n k_{ij}w_j = \mp V_e^{gas} \cdot \dot{m}_i. \quad (8)$$

Уравнение движения всей механической системы относительно указанного положения равновесия будет иметь вид

$$M\ddot{W} + KW = R. \quad (9)$$

Здесь w_j – перемещения узлов механической системы, включаядвигающиеся по сейсмограмме землетрясения опорные узлы; R – вектор управляющих демфирующих воздействий,

$$R = [0 \ 0 \ \dots \pm R_i \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T. \quad (10)$$

При условии постоянного тормозящего воздействия

$$R = [0 \ 0 \ \dots H_i \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T, \quad (11)$$

где

$$H = -|R_i| \text{sign}(\dot{w}_i), \quad (12)$$

действует следующее правило знаков:

$$\text{sign} = 1 \text{ при } \dot{w}_i > 0, \quad (13)$$

$$\text{и } \text{sign} = -1 \text{ при } \dot{w}_i < 0. \quad (14)$$

Введем еще одно обозначение:

$$V = W \mp K^{-1}R. \quad (15)$$

Так как последнее слагаемое в (15) – это набор констант, дифференцирование выражения (15) по времени дает:

$$\dot{V} = \dot{W}. \quad (16)$$

При этом уравнение (9) принимает вид:

$$M\ddot{V} + KV = 0. \quad (17)$$

Пусть последние m перемещений системы уравнений описывают движение опор здания или сооружения с помощью функций

$$f_n, f_{n-1}, \dots, f_{n-m}. \quad (18)$$

Тогда, отбрасывая из (17) последние m строк с известными перемещениями, получаем разрешающую систему $n-m$ уравнений вида:

$$M^0\ddot{V}^0 + K^0V^0 = -\bar{k}_n \cdot f_n - \bar{k}_{n-1} \cdot f_{n-1} - \dots - \bar{k}_{n-m} \cdot f_{n-m}, \quad (19)$$

где $\bar{k}_n, \bar{k}_{n-1}, \dots, \bar{k}_{n-m}$ – обрезанные столбцы исходной матрицы жесткости K (см. (17)); n – общее число перемещений.

Сейсмограмму землетрясения (см. рис. 1) можно условно разделить на участки и приближенно представить в виде набора гармонических возмущений. При гармоническом возбуждении колебаний на заданном интервале времени

$$f_i = b_i \cdot \sin(\theta t) \quad (20)$$

и вектор сейсмической нагрузки будет иметь вид

$$P_{sei} = \sum_{i=n-m}^n \bar{k}_i \cdot b_i \cdot \sin(\theta t). \quad (21)$$

Здесь b_i – заданные амплитуды; θ – частота сейсмических возмущений.

А уравнение (19) примет форму:

$$M^0\ddot{V}^0 + K^0V^0 = P_{sei}. \quad (22)$$

Решение уравнения (22) имеет вид:

$$V^0 = (K^0 - \theta^2 M^0)^{-1} P_{sei}. \quad (23)$$

При движении опор по реальной сейсмограмме уравнение (19) решается одним из прямых методов (Ньюмарка, центральных разностей, Вилсона, методом смещенных разностей).

Окончательный вектор перемещений будет иметь вид:

$$U = V^0 \pm K^{-1}R + U^0, \quad (24)$$

где вектор U^0 соответствует статическому решению уравнения

$$KU^0 = P. \quad (25)$$

После окончания сейсмических возмущений задача определения перемещений сводится к однородному дифференциальному уравнению

$$M^0\ddot{V}^0 + K^0V^0 = 0, \quad (26)$$

которое, кроме численного решения, имеет и известное аналитическое решение. С учетом (15) это аналитическое решение примет вид:

$$V_k = \mp K^{-1}R + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \beta_k) \cdot V_{ik}^0, \quad (27)$$

где V_{ik}^0 – векторы собственных форм колебаний; A_k, β_k – постоянные интегрирования.

График колебаний принимает вид линейно затухающей синусоиды (рис. 2).

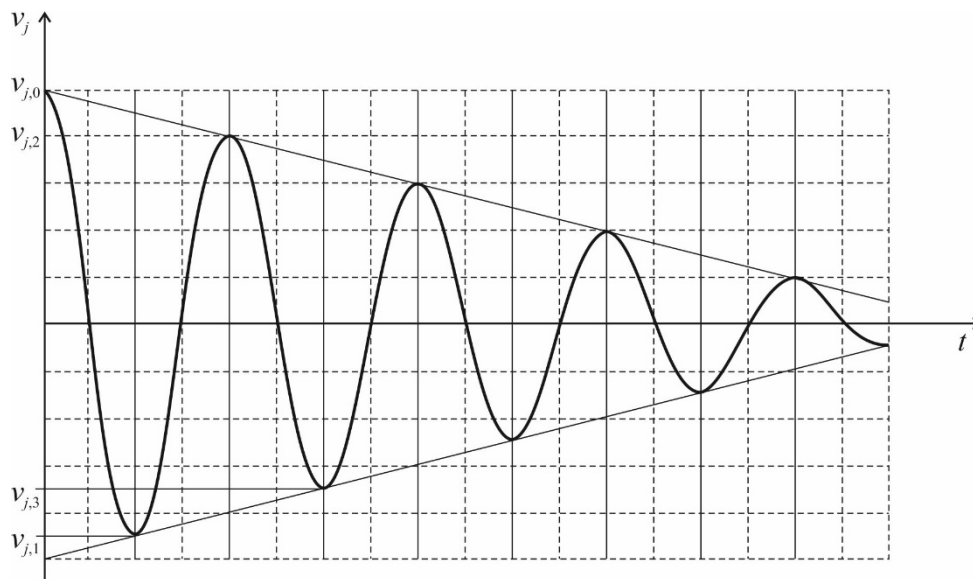


Рис. 2. Затухание колебаний после окончания сейсмических возмущений

Выводы. Приведены решения системы дифференциальных уравнений движения с реактивным демпфированием кинематически возбужденных колебаний при возмущениях гармонического характера и после снятия возмущающей нагрузки. Представленные преобразования помогают более четко моделировать задачу по гашению колебаний механических систем.

Список литературы

1. Корнев, Б.Г. К расчету динамического гасителя с нелинейным сопротивлением / Б.Г. Корнев, А.Н. Блехерман // Исследования по динамике сооружений: труды ЦНИИСК. – М.: Стройиздат, 1974. – Вып. 34. – С. 102–111.
2. Дукарт, А.В. О применении динамических гасителей колебаний для виброзащиты высотных зданий башенного типа при сейсмических воздействиях / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Известия вузов. Строительство. – 2003. – №11. – С. 4–10.
3. Корнева, Е.Б. Пластинчатые динамические гасители колебаний моментного типа / Е.Б. Корнева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 3. – С. 28–32.
4. Остроумов, Б.В. Исследование, разработка и внедрение высотных сооружений с гасителями колебаний: дис. ... д-ра техн. наук / Б.В. Остроумов. – М., 2003. – 425 с.
5. Шеин, А.И. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №1.
6. Шеин, А.И. Сравнительная оценка работоспособности реактивного жидкостного гасителя колебаний при сейсмических колебаниях башен, заданных акселерограммами / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Актуальные проблемы механики в совре-

менном строительстве: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С.175–185.

7. Шеин, А.И. Активный жидкостный гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, О.Г. Земцова, Д.А. Шмелев, Р.Х. Ракматуллин //Актуальные проблемы современного строительства: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С.365–367.

8. Shein, Alexander. Damping vibrations of a hyperbolic cooling tower using a reactive damper / Alexander Shein, Olga Zemtsova, Alexander Chumanov, Mikhail Frolov // E3S Web of Conferences», «Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies EMMFT 2023». – Vol. 458. – //doi.org/10.1051/e3sconf/202345808014. – 2023.

9. Шеин, А.И. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2023. – №17. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/matematicheskoe-modelirovanie-chislennyye-metody-i-kompleksy-programm/17.01/at_download/file

10. Shein, A.I. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener. / A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.G. Tamrazyan and T.A. Matseevich //Journal of Structural Engineering. – August – September, 2023. – Vol. 50, No. 3. – P. 177–183.

References

1. Korenev, B.G. To the calculation of a dynamic damper with nonlinear resistance / B.G. Korenev, A.N. Blekherman // Research on the dynamics of structures: Proceedings of the Central Research Institute. – M.: Stroyizdat, 1974. – Issue 34. – P. 102–111.

2. Dukart, A.V. On the use of dynamic vibration dampers for vibration protection of tower-type high-rise buildings under seismic influences / A.V. Dukart, A.I. Oleinik // Izvestiya vuzov. Construction. – 2003. – No.11. – P. 4–10.

3. Koreneva, E.B. Plate dynamic vibration dampers of the moment type / E.B. Koreneva // Construction mechanics and calculation of structures. – 2009. – No. 3. – P. 28–32

4. Ostroumov, B.V. Research, development and implementation of high-rise structures with vibration dampers: diss. ... doct. of Sciences / B.V. Ostroumov. – M., 2003. – 425 p.

5. Shein, A.I. Evaluation of the effectiveness of an active liquid vibration dampener for high-rise structures under non-stationary influences / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Construction mechanics and calculation of structures. – 2014. – №1.

6. Shein, A.I. Comparative assessment of the performance of a reactive liquid vibration dampener during seismic vibrations of towers set by accelerograms / A.I. Shein, D.A. Shmelev // Actual problems of mechanics in modern construction: proceedings of the International Conference. – Penza, 2013. – P.175–185.

7. Shein, A.I. Active liquid vibration dampener for high-rise structures under seismic influences / A.I. Shein, O.G. Zemtsova, D.A. Shmelev, R.H. Rakhmatullin //Current problems of modern construction: proceedings of the International Conference. – Penza, 2013. – P.365–367.

8. Shein, Alexander. Damping vibrations of a hyperbolic cooling tower using a reactive damper / Alexander Shein, Olga Zemtsova, Alexander Chumanov, Mikhail Frolov // E3S Web of Conferences», «Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies EMMFT 2023». – Vol. 458. – //doi.org/10.1051/e3sconf/202345808014. – 2023.

9. Shein, A.I. Mathematical modeling of the operation of a reactive vibration dampener of a cooling tower / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2023. – №17. – Systems. Requirements: Adobe Acrobat Reader. – URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/matematicheskoe-modelirovanie-chislennyye-metody-i-kompleksy-programm/17.01/at_download/file.

10. Shein, A.I. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener / A.I. Shein, M.B. Zaitsev, A.G. Tamrazyan and T.A. Matseevich //Journal of Structural Engineering. – August – September, 2023. – Vol. 50, No. 3. – P. 177–183.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

ENGINEERING SYSTEMS

УДК 621.6.036

DOI 10.54734/20722958_2024_4_171

АО «Гипрониигаз»

Россия, 410012, г. Саратов,
проспект им. Петра Столыпина, д.54

Хомутов Антон Олегович,

кандидат технических наук, заместитель
генерального директора по научному
развитию

E-mail: khomutov.anton@gmail.com

*Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.*

Россия, 410054, г. Саратов,
Политехническая, д. 77

Усачев Александр Прокофьевич,

доктор технических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Рулев Александр Владимирович,

доктор технических наук,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение
и нефтегазовое дело»

E-mail: nautech@inbox.ru

JSC Giproniigas

Russia, 410012, Saratov, 54,
prospect named after him. Peter Stolypin

Khomutov Anton Olegovich,

Candidate of Sciences, Deputy Director
General for Scientific Development
E-mail: khomutov.anton@gmail.com

*Yuri Gagarin State Technical University of
Saratov*

Russia, 410054, Saratov, 77, Polytechnic St.

Usachev Aleksander Prokofievich,

Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Heat and Gas Supply and
Oil and Gas Engineering»

E-mail: usachev-ap@mail.ru

Rulev Aleksandr Vladimirovich,

Doctor of Sciences, Professor
of the Department «Heat and Gas Supply and
Oil and Gas Engineering»

E-mail: nautech@inbox.ru

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО КОЛИЧЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАССЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ДЛЯ ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ, РАЗМЕЩЕННЫХ ВНУТРИ ОДНОГО КОРПУСА

А.О. Хомутов, А.П. Усачев, А.В. Рулев

Предложены принцип и математическая модель, позволяющие определять экономически целесообразное количество коротких фильтрующих цилиндрических кассет, установленных одна на другую, в двухступенчатых газовых фильтрах, учитывать долю площади наружных ограждений и утеплителя в помещении, количество теплоты для его теплоснабжения.

Ключевые слова: разработка, принцип, математическая модель, цилиндрические кассеты, предварительная и тонкая очистка, жидкие и газообразные топлива, размещение внутри одного корпуса

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLE AND MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE ECONOMICALLY FEASIBLE NUMBER OF CYLINDRICAL PRE- AND FINE CLEANING CASSETTES FOR LIQUID AND GASEOUS FUELS, PLACED INSIDE ONE HOUSING

A.O. Khomutov, A.P. Usachev, A.V. Rulev

The article proposes a principle and a mathematical model that allows determining the economically feasible number of short cylindrical filter cassettes mounted one on top of another in two-stage gas filters, taking into account the proportion of the area of external fences and insulation in the room, the amount of heat for its heat supply.

Keywords: development, principle, mathematical model, cylindrical cassettes, pre- and fine cleaning, liquid and gaseous fuels, placement inside one housing

Введение

Пункты очистки жидких и газообразных топлив от мехпримесей являются важнейшими структурными элементами систем снабжения сетевым и сжиженным газом, нефтью и печным жидким топливом, которые обеспечивают надежность, безопасность [1-3] и экономичность функционирования основных потребителей [4]. Для достижения требуемого качества эксплуатации используются цилиндрические двухступенчатые фильтры (ЦДФ) очистки с размещением фильтрующих цилиндрических кассет (ФЦК) предварительной и тонкой очистки в отдельных корпусах [5–7]. При этом в качестве первой ступени широкое распространение получили установки предварительной очистки из сетки, выполненной из металла [8–10], а в качестве второй ступени – установки тонкой очистки, выполненные из нетканых материалов [11–13]. Фильтрующее оборудование, эксплуатируемое в климатических условиях Российской Федерации, рекомендуется устанавливать в отапливаемых помещениях по ГОСТ Р 54960-2012 [1].

Для уменьшения материалоемкости ЦДФ предварительной и тонкой очистки, работающих при высоких давлениях и имеющих значительные толщины стенок цилиндрических обечаек и фланцев, было предложено располагать их внутри одного корпуса [14]. В этом случае отпадает необходимость в дополнительных площадях для размещения двух отдельных корпусов ЦДФ, а также в расходах на отопление и вентиляцию дополнительного объема помещения для их установки [15].

Важным параметром цилиндрического фильтрующего оборудования высокого и среднего давления, характеризующим его металлоемкость, является соотношение высоты H и диаметра D (рис. 1), обозначаемое как «фактор формы», то есть $\Phi = H/D$. Результаты исследований по оптимизации величины Φ при расположении фильтров очистки газа в отдельном корпусе приведены в работе [15]. Вместе с тем при размещении ФЦК предварительной и тонкой очистки внутри одного корпуса значение диаметра ЦДФ будет всегда больше по сравнению с расположением ФЦК предварительной и тонкой очистки в отдельных корпусах при одинаковой их пропускной способности. Проведенные исследования показывают, что минимальная стоимость ЦДФ имеет место при значении фактора формы, равном $\Phi = H/D = 3,3$. Тогда высота $H_{\text{фцк}}$ одной цельной фильтрующей кассеты будет равняться 0,65 от высоты корпуса фильтра H (рис. 1), то есть

$$H_{\text{фцк}} = 0,65H. \quad (1)$$

В этом случае следует предусмотреть дополнительную высоту стен в размере $H_{\text{фцк}}$ для извлечения из корпуса ЦДФ такой неразборной ФЦК при проведении операции удаления из нее мехпримесей. При этом увеличиваются поверхность наружных строительных конструкций и количество тепловой энергии для компенсации теплопотерь через эти конструкции, так как это показано на рис. 1.

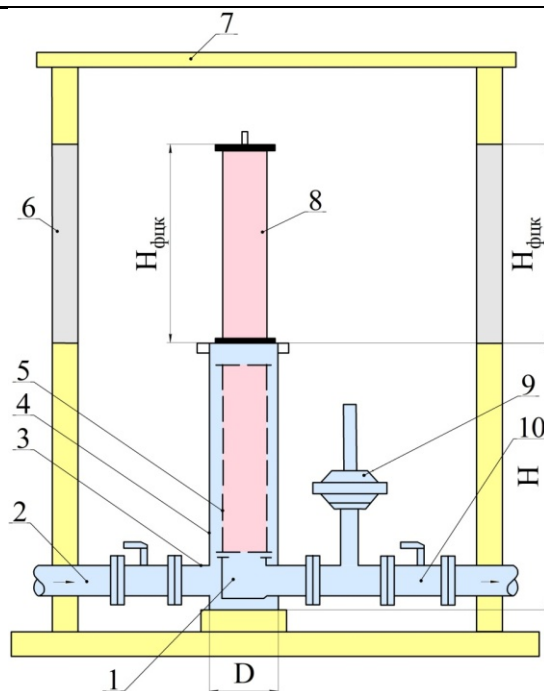


Рис. 1. Увеличение высоты наружных ограждений $H_{\text{фцк}}$, необходимое для демонтажа монолитной ФЦК при проведении операции удаления из нее мехпримесей:

1 – стакан; 2, 3 – трубопровод и патрубок на входе в ЦДФ; 4 – корпус ЦДФ; 5 – ФЦК во время эксплуатации (дана пунктирной линией); 6 – стена помещения, требуемая для демонтажа ФЦК при проведении операции удаления из нее мехпримесей; 7 – перекрытие; 8 – ФЦК, извлеченная из корпуса ЦДФ при проведении операции удаления из нее мехпримесей; 9 – регулирующая и предохранительная арматура; 10 – отключающая арматура

Целью работы является разработка принципа сокращения материалоемкости наружных строительных конструкций, а также математической модели определения экономически целесообразного количества цилиндрических кассет предварительной и тонкой очистки для жидких и газообразных топлив, размещенных внутри одного корпуса ЦДФ, эксплуатируемого в отапливаемом помещении

Методы исследования и моделирования. Разработка принципа сокращения стоимости ЦДФ и математической модели выбора экономически целесообразного количества ФЦК

Для снижения стоимости наружных стен, отводимых для извлечения ФЦК в течение удаления механических примесей, согласно рис. 2, разработан принцип по установке ряда кассет количеством $n_{\text{фцк}}$, расположенных одна на другой:

$$n_{\text{фцк}} = H_{\text{фцк}} / h_{\text{фцк}}, \quad (2)$$

где $H_{\text{фцк}}$ – высота блока из нескольких коротких ФЦК, м; $h_{\text{фцк}}$ – высота одной вертикально установленной короткой ФЦК, м.

Соединение таких ФЦК в один разборный блок, с целью обеспечения требуемой устойчивости, осуществляется посредством специальной трубины.

Основными элементами предложенной модели являются: расчетная схема (см. рис. 2); целевая функция интегральных затрат (2); уравнения стоимости изготовления ЦДФ и помещения (3)–(5); уравнения затрат по эксплуатации (6)–(7); ограничение независимой переменной (8). Предложенная модель (2)–(8) впервые позволяет определять оптимальное значение независимой переменной, то есть количество коротких ФЦК, установленных одна на другую, учитывать долю площади наружных ограждений и утеплителя в помещении, предназначенном для демонтажа ФЦК, количество теплоты для его теплоснабжения.

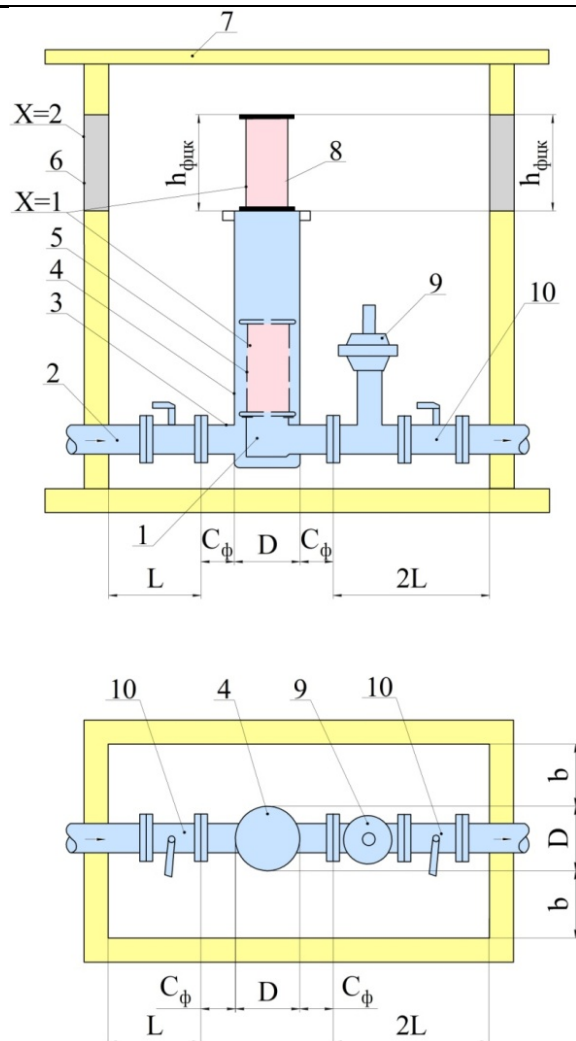


Рис. 2. Расчетная схема размещения ЦДФ в технологическом помещении с установкой нескольких коротких ФЦК, расположенных одна на другой:

5 – одна короткая ФЦК высотой $h_{\text{фцк}}$, еще находящаяся в корпусе ЦДФ при проведении операции удаления мехпримесей; 8 – вторая короткая ФЦК высотой $h_{\text{фцк}}$, полностью извлеченная из корпуса ЦДФ при проведении операции удаления мехпримесей.

(Остальные позиции на рис. 2 обозначены так же, как и на рис. 1)

Независимой переменной математической модели (2)–(8) принят параметр $n_{\text{фцк}}$, поскольку он учитывает противоположное влияние на стоимость изготовления различных элементов ФЦК ($x=1$ на рис. 2) и наружных ограждений ($x=2$ на рис. 2), отводимых для их размещения, а также эксплуатационные расходы для компенсации теплопотерь через эти наружные ограждения.

Так, уменьшение высоты $h_{\text{фцк}}$ вертикально установленных ФЦК позволит производить демонтаж, поднимая их над верхней отметкой ЦДФ на расстояние $h_{\text{фцк}}$ (см. рис. 2), что приведет к возрастанию независимой переменной $n_{\text{фцк}}$ и снижению стоимости строительных ограждений и утеплителя ($x=2$, рис. 2). С другой стороны, с уменьшением высоты $h_{\text{фцк}}$ вертикально установленных ФЦК увеличивается стоимость их изготовления ($x=1$, рис. 2), поскольку вместо одной ФЦК производится $n_{\text{фцк}}$ фильтрующих кассет, а следовательно, возрастают количество кольцеобразных крышек и оснований для крепления фильтрующих сеток, а также стоимость их сборки.

Таким образом, $n_{\text{фцк}}$ является независимой переменной математической модели (2)–(8).

В настоящее время известны отдельные работы по минимизации стоимости изготовления цилиндрических одноступенчатых фильтров путем определения экономически целесообразного значения фактора формы Φ их корпуса [16, 17]. однако в

этих работах не ставилась задача определения экономически целесообразного количества фильтрующих кассет $n_{\text{фцк}}$. По этой причине известные решения являются неприемлемыми для поиска экономически целесообразного количества ФЦК, размещаемых внутри одного корпуса фильтра.

Критерий оптимума $n_{\text{фцк}}$, согласно [18], принимается при минимуме интегральных затрат И на изготовление блока ФЦК и наружных ограждений помещения для его установки:

$$\begin{aligned} \text{И} = \sum_{x=1}^{x=2} Z_x(n_{\text{фцк}}) + \sum_{t=1}^T (1+E)^{-t} \cdot \sum_{n=1}^{n=4} \psi_{x,э,n} \cdot \sum_{x=1}^{x=2} Z_x(n_{\text{фцк}}) + \\ + \sum_{t=1}^T (1+E)^{-t} \cdot \mathcal{E}_{n=5}(n_{\text{фцк}}) = \min, \end{aligned} \quad (2)$$

где И – интегральные затраты, руб.; t – год эксплуатации ЦДФ от $t=1$ до $t=T$; $\sum_{x=1}^{x=2} Z_x(n_{\text{фцк}})$ – суммарная стоимость изготовления ФЦК и ограждений помещения для их установки, руб.; x – номер основных составляющих стоимости, изменяемый от: $x=1$ – блока из нескольких ФЦК; $x=2$ – строительных ограждений и тепловой изоляции помещения для установки ФЦК; $\sum_{t=1}^T (1+E)^{-t}$ – интегральный параметр дисконтирования, лет; E – величина кредитной ставки, 1/год; $\psi_{x,э,n}$ – годовые отчисления на обслуживание, текущий и капитальный ремонт элемента x , 1/год; n – номер элемента эксплуатационных расходов ЦДФ: $n=1$ – на обслуживание; $n=2$ – на текущий ремонт; $n=3$ – на капитальный ремонт; $n=4$ – на демонтаж ФЦК при проведении очистки от мехпримесей; $n=5$ – на обогрев ЦДФ; $\mathcal{E}_{n=5}(n_{\text{фцк}})$ – эксплуатационные затраты на обогрев ЦДФ, руб./год.

Стоимость изготовления фильтрующего цилиндрического блока ($x=1$), устанавливаемого в помещении, и строительных ограждений совместно с тепловой изоляцией помещения ($x=2$) представляется как:

$$\sum_{x=1}^{x=2} Z_x(n_{\text{фцк}}) = Z_{x=1} + Z_{x=2}, \quad (3)$$

где $Z_{x=1}$, $Z_{x=2}$ – соответственно стоимость изготовления фильтрующей цилиндрической кассеты и всех стен помещения высотой $h_{x=2} = H_{x=2}/n_{x=2}$, необходимой для извлечения одной короткой ФЦК, руб.

Стоимость изготовления фильтрующей цилиндрической кассеты находится по формуле

$$Z_{x=1}(n_{\text{фцк}}) = z_{x=1} \cdot m_{x=1} \cdot S_{x=1} \cdot F_{x=1} = z_{x=1} \cdot m_{x=1} \cdot S_{x=1} \cdot \pi \cdot D_{x=1} \cdot H_{x=1}, \quad (4)$$

где $Z_{x=1}$ – удельная стоимость изготовления ФЦК, руб./кг; $S_{x=1}$ – средняя толщина сетки ФЦК, м; $m_{x=1}$ – удельная металлоемкость сетки ФЦК, кг/м²; $F_{x=1}$ – общая площадь ФЦК, м²; $H_{x=1}$, $D_{x=1}$ – общая высота и диаметр ФЦК, м.

Величина $Z_{x=2}$ стоимости всех стен помещения высотой $h_{\text{фцк}}$ определяется согласно рис. 2:

$$\begin{aligned} Z_{x=2}(n_{\text{фцк}}) = z_{x=2} \cdot \rho_{x=2} \cdot S_{x=2} \cdot F_{x=2} = z_{x=2} \cdot \rho_{x=2} \cdot S_{x=2} \cdot \\ \cdot 2 \frac{H_{\text{фцк}}}{n_{\text{фцк}}} \left\{ \left[(D + 2C_{\phi}) + 3L \right] + \left[(D + 2C_{\phi}) + 2b \right] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z_{x=2}$ – величина удельной стоимости наружных стен, руб./кг; $\rho_{x=2}$ – плотность материала наружных стен, кг/м³; $S_{x=2}$ – величина средней толщины наружных стен, м; $F_{x=2}$ – площадь наружных стен, отводимая для демонтажа ФЦК, м²; C_{ϕ} – длина патрубков на входе и выходе ЦДФ (см. рис. 2), м; D – диаметр ЦДФ, м; L – длина

помещения, отводимая для размещения арматуры, установленной рядом с ЦДФ, м;
 b – расстояние между боковой поверхностью помещения и оборудованием, м.

Расходы по эксплуатации, входящие в функцию (1) для каждого x -го элемента ФЦК, капитальному ($m=1$), текущему ($m=2$) ремонтам, техническому обслуживанию ($m=3$) и демонтажу ФЦК ($m=4$) определяются в качестве доли от стоимости изготовления $\psi_{x,э,n}$:

$$\sum_{t=1}^T (1+E)^{-t} \cdot \sum_{n=1}^{n=4} \psi_{x,э,n} \cdot \sum_{x=1}^{x=2} Z_x (n_{\text{фцк}}) = \sum_{t=1}^T (1+E)^{-t} \cdot \sum_{n=1}^{n=4} \psi_{x,э,n} (Z_{x=1} + Z_{x=2}). \quad (6)$$

Годовые расходы по эксплуатации ($n=5$) для компенсации тепловых потерь через наружные стены, отводимые для демонтажа ФЦК, определяются как:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{n=5}(n_{\text{фцк}})_{x=2} &= Q_{m,x=2}(n_{\text{фцк}})_{x=2} C_t (\tau / \eta_t) = C_t k_{x=2} \cdot (\tau / \eta_t) \cdot (t_b - t_{c,o})(1+\beta) \cdot F_{\text{ст}} = \\ &= C_t k_{x=2} \cdot (\tau / \eta_t) (t_b - t_{c,o})(1+\beta) \cdot 2 \frac{H_{\text{фцк}}}{n_{\text{фцк}}} \{ [(D+2C_{\phi}) + 3L] + [(D+2C_{\phi}) + 2b] \}, \end{aligned} \quad (7)$$

где τ – число часов работы системы теплоснабжения в годовой период, ч; C_t – удельная стоимость энергоносителя в пункте его отпуска в местные сети, руб./(МВт·ч); $Q_{m,x=2}$ – теплопотери через наружные стены, требуемые для демонтажа ФЦК, МВт; η_t – величина коэффициента полезного действия системы теплоснабжения, д.е.; t_b – значение температуры воздуха внутри технологического помещения, °С; $t_{c,o}$ – средняя температура наружного воздуха за период со значением температуры, меньшим и равным нулю, °С; β – значение суммарного коэффициента, учитывающего надбавки на теплопотери через наружные ограждения, д.е.; $k_{x=2}$ – коэффициент теплопередачи через наружные ограждения, Вт/(м²·К).

Ограничение значений независимой переменной описывается неравенством

$$(n_{x=1})_{\min} \leq (n_{x=1}) \leq (n_{x=1})_{\max}. \quad (8)$$

Минимальная величина $(n_{x=1})_{\min}$ в неравенстве (8) составляет 1,0, а максимальное значение $(n_{x=1})_{\max}$ равно 5,0.

Результаты расчета экономически целесообразного количества фильтрующих кассет. Обсуждение полученных результатов

Из анализа уравнений (1)–(8) следует, что исходная целевая функция задачи для ФЦК описывается выражением

$$I = f(n_x). \quad (9)$$

Для определения экономически целесообразного количества фильтрующих кассет $(n_x)_{\text{opt}}$ наиболее простым и обеспечивающим требуемую точность является численный метод решения задачи [19, 20]. Здесь при значениях параметра $(n_x)_1, (n_x)_2, (n_x)_3, \dots, (n_x)_y$ получаем величины интегральных затрат $I_1, I_2, I_3, \dots, I_y$. Варианту с минимальными затратами $I_{\min}$ соответствует экономически целесообразное количество фильтрующих кассет $(n_x)_{\text{opt}}$.

Результаты расчетов по определению экономически целесообразного количества ФЦК, согласно приведенной модели (2)–(8), для фильтра с диаметром корпуса $D=500$ мм представлены на графике (рис. 3).

Из графика видно, что экономически целесообразное значение $(n_x)_{\text{opt}}$ для ЦДФ диаметром 500 мм равно 2,05, или при округлении до целого числа получаем $n_{\text{фцк-опт}}=2,0$. Из дополнительно произведенных расчетов следует, что с уменьшением диаметра ЦДФ величина $n_{\text{фцк-опт}}$ также снижется.

Вместе с тем, согласно данным заводов-изготовителей, фильтрующие цилиндрические кассеты выпускаются в настоящее время отечественными предприятиями ФЦК как цельная неразборная конструкция с количеством кассет, равным $n_{\text{фцк}}=1,0$.

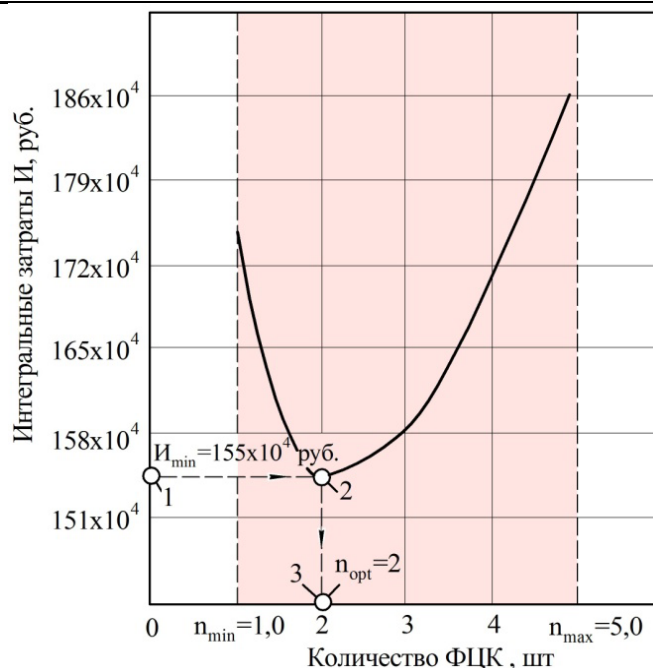


Рис. 3. Экономически целесообразное значение $(n_x)_{opt}$ для ЦДФ диаметром 500 мм

Общий вид двух ФЦК 2 и 4 производства АО «Гипрониигаз», подготовленных к установке внутри корпуса ЦДФ диаметром 500 мм, приведен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид двух ФЦК производства АО «Гипрониигаз», установленных одна на другой и подготовленных к монтажу внутри корпуса фильтра диаметром 500 мм:

1 – кольцеобразная нижняя пластина каждого из фильтрующих гофрированных устройств, выполняющая функцию поперечного ребра жесткости; 2, 4 – соответственно нижняя и верхняя фильтрующие кассеты, каждая из которых имеет в своем составе одинаковые опорные оболочки; 3 – кольцеобразная верхняя пластина каждой из фильтрующих кассет 2 и 4, выполняющая функцию поперечного ребра жесткости; 5 – защитная полиэтиленовая пленка; 6 – крышка

Каждое из фильтрующих устройств 2 и 4 имеет нижнюю 1 и верхнюю 3 кольцеобразные пластины, выполняющие функцию поперечных ребер жесткости разборного фильтрующего блока.

Выводы

В целях уменьшения материалоемкости ЦДФ предварительной и тонкой очистки, работающих при высоких давлениях и имеющих значительные толщины стенок цилиндрических обечаек и фланцев, было предложено размещать их внутри одного корпуса согласно разработанному патенту № 174446 с приоритетом от 13.10.2017 г. В этом случае отпадает необходимость в дополнительных площадях для размещения двух отдельных корпусов ЦДФ, а также в расходах на отопление и вентиляцию дополнительного объема помещения для их установки.

Минимальная стоимость ЦДФ имеет место при значении фактора формы, равно $\Phi = H/D = 3,3$. В этом случае высота $H_{\text{фцк}}$ одной цельной фильтрующей кассеты будет равняться 0,65 от высоты корпуса фильтра H (см. рис. 1), что потребует дополнительную высоту помещения, равную величине $H_{\text{фцк}}$, для извлечения из корпуса ЦДФ такой неразборной ФЦК при удалении из нее мехпримесей. При этом увеличиваются поверхность наружных строительных конструкций и количество тепловой энергии для компенсации теплопотерь через эти конструкции.

Для снижения стоимости наружных стен, отводимых для извлечения ФЦК в течение операции по удалению механических примесей, согласно рис. 2, предлагается установить ряд кассет количеством $n_{\text{фцк}}$, расположенных одна на другой, с высотой каждой из них, равной суммарной высоте разборного блока, поделенной на количество $n_{\text{фцк}}$.

Предложенная модель (2)–(8) по расчету экономически целесообразного количества $n_{\text{фцк}}$ коротких ФЦК, установленных одна на другую для ЦДФ, располагаемого в обогреваемом помещении, впервые позволяет определять оптимальное значение независимой переменной, то есть количество $n_{\text{фцк}}$ коротких ФЦК, установленных одна на другую, учитывать долю площади наружных ограждений и утеплителя в помещении, предназначенном для демонтажа ФЦК, количество теплоты для теплоснабжения помещения.

Независимой переменной математической модели (2)–(8) принят параметр $n_{\text{фцк}}$, поскольку он учитывает противоположное влияние на стоимость изготовления различных элементов ФЦК ($x=1$ на рис. 2) и наружных ограждений ($x=2$ на рис. 2), отводимых для их размещения, а также эксплуатационные расходы для компенсации теплопотерь через эти наружные ограждения. Так, уменьшение высоты $h_{\text{фцк}}$ вертикально установленных ФЦК позволит производить демонтаж, поднимая их над верхней отметкой ЦДФ на расстояние $h_{\text{фцк}}$ (см. рис. 2), что приведет к возрастанию независимой переменной $n_{\text{фцк}}$ и снижению стоимости строительных ограждений и утеплителя ($x=2$, рис. 2). С другой стороны, с уменьшением высоты $h_{\text{фцк}}$ вертикально установленных ФЦК увеличивается стоимость их изготовления ($x=1$, рис. 2), поскольку вместо одной ФЦК производится $n_{\text{фцк}}$ фильтрующих кассет, а следовательно, возрастают количество кольцеобразных крышек и оснований для крепления фильтрующих сеток, а также стоимость их сборки.

Экономически целесообразное значение независимой переменной в соответствии с разработанной математической моделью (2)–(8) составляет $n_{\text{opt}} = 2,0$.

Список литературы

1. Павлов, С.И. Повышение стабильности и надежности работы ГРП за счет модернизации оборудования / С.И. Павлов // Газовая промышленность. – 2019. – №S3. – С. 78–80.
2. Mokhatab, S. Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices / S. Mokhatab, W.A. Poe, J.Y. Mak // Gulf professional publishing. – 2018. – 827 p.

3. Sutherland, K. *Filters and Filtration Handbook* / K. Sutherland // Elsevier Science. – 2018. – 523 p.
4. Speight, J.G. *Natural gas: a basic handbook* / J.G. Speight. – Gulf Professional Publishing, 2018. – 449 p.
5. Stephens, B. *Control of Airborne Particles: filtration* / B. Stephens, A. Maynard, P.K. Hopke // *Handbook of Indoor Air Quality*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 1715–1736.
6. Справочник промышленного газового оборудования. – URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html> (дата обращения 10.07.2024 г.).
7. Чумаченко, Д.А. Анализ эффективности пылеуловителей для природного газа / Д.А. Чумаченко, И.Н. Колесников // *Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации*. – 2017. – №. 1. – С. 25–30.
8. Каракеян, В.И. *Технология очистки газов* / В.И. Каракеян, В.Б. Кольцов, О.В. Кондратьева. – М.: Юрайт, 2024. – 184 с.
9. Trevor, S. *Filters and Filtration Handbook* / S. Trevor. – 5 edition. – Elsevier Butterworth Heinemann, 2016. – 444 p.
10. Hutten, I.M. *Handbook of Nonwoven Filter Media* / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
11. Ахмедов, И.Г. Принципы выбора газоочистного оборудования / И.Г. Ахмедов, И.И. Умаров, Ф.А. Дадаханов // *Journal of new century innovations*. – 2023. – Т. 43, №1. – С. 153–165.
12. Russell, S.J. *Handbook of nonwovens* / S.J. Russell. – Woodhead Publishing, 2022. – 627 p.
13. Thomas, D. *Aerosol Filtration* / D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J-C. Appert-Collin. – ISTE Press. Elsevier, 2016. – 218 p.
14. Патент № 174446 Российская Федерация, МПК B01D 46/24(2006.01). Устройство для очистки от твердых частиц природного газа высокого давления: № 2017111708: заявл. 06.04.17: опубл. 13.10.17 / Шурайц А.Л., Усачев А.П., Хомутов А.О., Рулев А.В. – 4 с.
15. Усачев, А. П. Теоретические и прикладные основы повышения эффективности и безопасности эксплуатации установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газораспределения: монография / А.П. Усачев, С.В. Густов, А.Л. Шурайц. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2013. – 172 с.
16. Шурайц, А.Л. Определение капитальных вложений в элементы фильтра, устанавливаемого в обогреваемом помещении / А.Л. Шурайц, С.В. Густов // *Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф.* – Уфа: ИПТЭР, 2014. – С. 240–242.
17. Шурайц, А.Л. Определение расходов в эксплуатацию газового фильтра, размещаемого в обогреваемом помещении / А.Л. Шурайц, С.В. Густов // *Энергоэффективность. Проблемы и решения: материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф.* – Уфа: ИПТЭР, 2014. – С. 243–244.
18. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 N ВК 477). – М., 1999. – 201 с.
19. Слабнов, В.Д. *Численные методы и программирование* / В.Д. Слабнов. – СПб.: Лань, 2021. – 460 с.
20. Коваленко, Т.А. *Вычислительная техника и языки программирования* / Т.А. Коваленко, А. Г. Солодов. – Самара: ПГУТИ, 2021. – 220 с.

References

1. Pavlov, S.I. Improving the stability and reliability of gas control points due to equipment modernization / S.I. Pavlov // *Gas industry*. – 2019. – №. S3. – P. 78–80.
2. Mokhatab, S. *Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices* / S. Mokhatab, W.A. Poe, J. Y. Mak // Gulf professional publishing. – 2018. – 827 p.

3. Sutherland, K. *Filters and Filtration Handbook* / K. Sutherland // Elsevier Science. – 2018. – 523 p.
4. Speight, J.G. *Natural gas: a basic handbook* / J.G. Speight. – Gulf Professional Publishing, 2018. – 449 p.
5. Stephens, B. *Control of Airborne Particles: filtration* / B. Stephens, A. Maynard, P.K. Hopke // *Handbook of Indoor Air Quality*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 1715–1736.
6. *Handbook of industrial gas equipment*. – URL: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik.html>. (accessed 07/10/2024).
7. Chumachenko, D. A. Analysis of the effectiveness of dust collectors for natural gas / D. A. Chumachenko, I.N. Kolesnikov // *Urban planning. Infrastructure. Communications*. – 2017. – No. 1. – P. 25–30.
8. Karakeyan, V.I. *Gas purification technology* / V.I. Karakeyan, V.B. Koltsov, O.V. Kondratieva. – M.: Yurait, 2024. – 184 p.
9. Trevor, S. *Filters and Filtration Handbook* / S. Trevor. – 5 edition. – Elsevier Butterworth Heinemann, 2016. – 444 p.
10. Hutten, I.M. *Handbook of Nonwoven Filter Media* / I.M. Hutten. – 2nd Edition. – Butterworth Heinemann, 2016. – 660 p.
11. Akhmedov, I.G. Principles of choosing gas cleaning equipment / I.G. Akhmedov, I.I. Umarov, F. A. Dadakhanov // *Journal of new century innovations*. – 2023. – Vol. 43, No. 1. – P. 153–165.
12. Russell, S.J. *Handbook of nonwovens* / S.J. Russell. – Woodhead Publishing, 2022. – 627 p.
13. Thomas, D. *Aerosol Filtration* / D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J-C. Appert-Collin. – ISTE Press. Elsevier, 2016. – 218 p.
14. Patent No. 174446 Russian Federation, IPC B01D 46/24(2006.01). Device for cleaning high-pressure natural gas from solid particles: No. 2017111708: application 06.04.17: publ. 13.10.17 / Shurait A.L., Usachev A.P., Khomutov A.O., Rulev A.V. – 4 p.
15. Usachev, A.P. Theoretical and applied foundations for improving the efficiency and safety of operation of installations for coarse purification of natural gas from solid particles in gas distribution systems: monograph / A.P. Usachev, S.V. Gustov, A.L. Shurait. – Saratov: Sarat. state Technical University. Univ., 2013. – 172 p.
16. Shurait, A.L. Determination of capital investments in filter elements installed in a heated room / A.L. Shurait, S.V. Gustov // *Energy efficiency. Problems and solutions: materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference*. – Ufa: IPTER, 2014. – P. 240–242.
17. Shurait, A.L. Determination of the cost of operation of a gas filter placed in a heated room / A.L. Shurait, S.V. Gustov // *Energy efficiency. Problems and solutions: materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference*. – Ufa: IPTER, 2014. – P. 243–244.
18. Methodological recommendations for evaluating the effectiveness of investment projects (approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, Gosstroy of the Russian Federation on 06/21/1999 N VK 477). – M., 1999. – 201 p.
19. Slabnov, V.D. *Numerical methods and programming* / V.D. Slabnov. – St. Petersburg: Lan, 2021. – 460 p.
20. Kovalenko, T.A. *Computer engineering and programming languages* / T.A. Kovalenko, A. G. Solodov. – Samara: PGUTI, 2021. – 220 p.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958_2024_4_181

*Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры*

Россия, Донецкая Народная Республика,
286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка,
ул. Державина, д. 2

Рожков Виталий Сергеевич,

доктор технических наук, доцент, директор
управления научно-исследовательской
деятельности и инноваций

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

ООО «Биофармацевтические системы»

Россия, 440000, Пенза, ул. Володарского,
96А, офис 2

Яхкин Михаил Ильич,

кандидат технических наук, генеральный
директор

E-mail: yah@sura.ru

*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

Князев Александр Анатольевич,

старший преподаватель кафедры
«Инженерная экология»

E-mail: ak-video@mail.ru

*Donbass National Academy of Civil
Engineering and Architecture*

Russia, Donetsk People's Republic,
286123, city district. Makeevsky,
Makeevka, 2, Derzhavina St.

Rozhkov Vitalii Sergeevich,

Doctor of Sciences, Associate Professor,
Director of the Research and Innovation
Department

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

Biopharmaceutical Systems LLC

Russia, 440000, Penza, 96A, office 2,
Volodarskogo St.

Yakhkind Michael Il'ich,

Candidate of Sciences, General Director

E-mail: yah@sura.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

Knyazev Aleksander Anatolyevich,

Senior Lecturer of the Department
«Environmental engineering»

E-mail: ak-video@mail.ru

ХИМИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА В СИНТЕЗЕ ФЕРРАТА НАТРИЯ НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

В.С. Рожков, М.И. Яхкин, А.А. Князев

Представлены результаты теоретического анализа процессов синтеза ферратов щелочных металлов методами химического и электрохимического окисления соединений железа. Доказано, что ферраты щелочных металлов обладают наибольшей активностью из всех известных в настоящее время реагентов-окислителей и могут быть успешно использованы для интенсификации процессов очистки и обеззараживания сточных вод. Установлено, что низкая стабильность растворов ферратов щелочных металлов обуславливает необходимость разработки технологии синтеза этих реагентов-окислителей непосредственно на площадке канализационных очистных сооружений. Наибольший интерес представляет использование раствора феррата натрия для технологических процессов очистки и обеззараживания сточных вод, поскольку его растворимость в растворах крепкой щелочи существенно превышает значение этого показателя для феррата калия. Установлено, что предпочтительным методом промышленного синтеза щелочного раствора феррата натрия на площадке канализационных очистных сооружений является электрохимическое окисление металла железного анода в 40 % растворе гидроксида натрия в электролизере с селективной мембраной.

Ключевые слова: мембранный электролизер, щелочной раствор, реагент-окислитель, феррат натрия, феррат калия, окисление соединения железа

CHEMICAL AND ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF IRON COMPOUNDS IN SODIUM FERRATE SYNTHESIS AT SEWAGE TREATMENT FACILITIES

V.S. Rozhkov, M.I. Yakhkind, A.A. Knyazev

The results of theoretical analysis of the processes of alkali metal ferrate synthesis by chemical and electrochemical oxidation of iron compounds are presented. It is proven that alkali metal ferrates have the highest activity of all currently known oxidizing reagents and can be successfully used to intensify wastewater treatment and disinfection processes. It is established that the low stability of alkali metal ferrate solutions necessitates the development of a technology for the synthesis of these oxidizing reagents directly at the site of sewage treatment plants. Of greatest interest is the use of sodium ferrate solution for technological processes of purification and disinfection of wastewater, since its solubility in solutions of strong alkali significantly exceeds the value of this indicator for potassium ferrate. It has been established that the most preferable method for industrial synthesis of alkaline sodium ferrate solution at the site of sewage treatment plants is electrochemical oxidation of the iron anode metal in a 40 % sodium hydroxide solution in an electrolyzer with a selective membrane.

Keywords: membrane electrolyzer, alkaline solution, oxidizing reagent, sodium ferrate, potassium ferrate, oxidation of iron compound

Традиционные станции биологической очистки сточных вод, отводимых с территории населённых пунктов, в настоящее время не в полной мере осуществляют биологическое разложение трудноокисляемых и токсичных для микроорганизмов активного ила органических загрязнений. Увеличение концентрации содержащихся в сточных водах галогенированных углеводородов, ароматических соединений, лекарственных препаратов, красителей, пестицидов, гербицидов требует широкомасштабного внедрения инновационных технологических схем глубокой доочистки сточных вод. Глубокое разложение и минерализацию трудноокисляемых органических соединений можно осуществить в процессе использования новых окислительных технологий (НОТ) (от англ. Advanced oxidation process, AOP). К разряду процессов НОТ относятся [1-3]:

- фотокаталитические процессы;
- различные варианты процесса Фентона;
- электрохимические процессы;
- мокрое окисление и окисление в суперкритической воде;
- плазменные процессы;
- персульфатная технология;
- ферратная технология.

Основную роль в процессах НОТ играют образующиеся гидроксидные радикалы $\text{OH}^\bullet$, характеризующиеся высоким значением стандартного окислительного потенциала, величина которого (см. таблицу) существенно превосходит этот показатель для озона.

Значения величин окислительных потенциалов

№ п/п	Окислитель	Окислительный потенциал, В	Окислительный потенциал от потенциала озона, %
1	Гидроксильные радикалы ($\text{OH}^\bullet$)	2,70	130
2	Ферраты (FeO_4^{2-})	2,20	106
3	Персульфаты ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)	2,10	101
3	Озон (O_3)	2,07	100
4	Пероксид водорода (H_2O_2)	1,78	86
5	Перманганат калия (KMnO_4)	1,70	82
6	Хлорноватистая кислота (HClO)	1,49	72
7	Гипохлорит натрия (NaClO)	1,36	66

Из всего перечня процессов НОТ особый интерес представляют технологические процессы, предусматривающие использование ферратов щелочных металлов. Ферраты щелочных металлов обладают многофункциональным действием по отношению к загрязнению сточных вод и являются одним из наиболее сильных из известных в настоящее время реагентов-окислителей. В кислой среде окислительный потенциал ионов FeO_4^{2-} (2,2 В) превосходит этот показатель для озона (2,07 В). Ферраты щелочных металлов способны осуществлять глубокое разложение и минерализацию трудноокисляемых органических загрязнений, а также производить высокоэффективное обеззараживание многих микроорганизмов, включая устойчивые к обычным дезинфектантам. Ферраты щелочных металлов представляют собой экологически чистые реагенты-окислители. Продуктом их разложения является образующийся в обрабатываемом растворе гидроксид железа(III), выделяющийся в виде коллоидных агрегатов, имеющих развитую поверхность и обладающих высокой абсорбционной активностью, что позволяет производить дополнительную очистку сточных вод методом адсорбции.

Основной причиной, препятствующей внедрению процессов ферратной обработки сточных вод, является низкая стабильность щелочных растворов ферратов, что вызывает необходимость разработки технологических процессов получения этих растворов непосредственно на площадке канализационных очистных сооружений.

Впервые феррат калия был получен французским ученым Фреми в 1841 г. [14]. Фреми были разработаны два основных метода, используемых в настоящее время для синтеза ферратов щелочных металлов [16]: «сухие» способы высокотемпературного окисления оксида Fe(III) (пиротехнические способы); «мокрый» способ, предусматривающий окисление находящихся в растворе химических соединений железа реагентами-окислителями.

Фреми были описаны четыре «сухих» способа получения феррата калия.

1-й способ предусматривает продувку потоком кислорода, нагретого до определенной температуры, смеси оксида железа с оксидом калия:



2-й способ отличается тем, что вместо оксида используется пероксид калия:



3-й способ предусматривает прокаливание смеси оксида железа, оксида калия и нитрата калия:



4-й способ предполагает прокаливание смеси порошкового железа с нитратом калия:

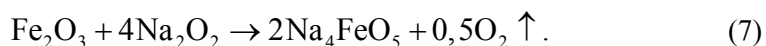
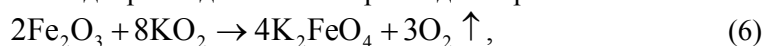


Проведенные экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективно процесс пиротехнического синтеза феррата калия протекает по второму способу.

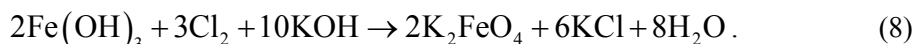
В [17] был описан еще один пиротехнический процесс получения феррата калия взаимодействием оксида железа и нитрата калия:



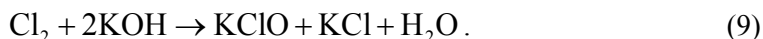
В [4] рассмотрен технологический процесс получения ферратов калия и натрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), предусматривающий использование надпероксида калия и пероксида натрия:



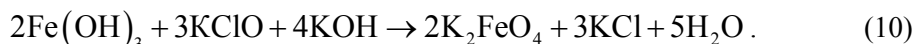
Для реализации «мокрого» способа химического синтеза Фреми предложил окислять суспензию гидроксида железа(III) в растворе концентрированной щелочи при пропускании через него газообразного хлора:



При этом процесс химического синтеза ферратов протекает в две стадии. На первой стадии наблюдаем растворение газообразного хлора в растворе щелочи и образование гипохлорита калия:

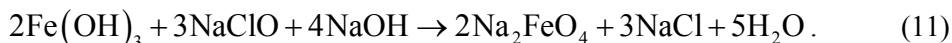


На второй стадии происходит синтез феррата калия:



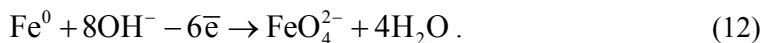
Выделение твердого осадка феррата калия из раствора Фреми проводил в процессе его осаждения при добавлении к раствору твердого гидроксида калия. Выделить осадок феррата натрия из раствора Фреми не удалось ввиду того, что феррат натрия имеет существенно большую растворимость (это относится и к другим описанным ниже способам получения феррата натрия в растворе).

В 50-х годах XX в. был предложен метод химического синтеза феррата натрия в растворе крепкой щелочи, предусматривающий использование в качестве окислителя гипохлорита натрия [18]:



При добавлении твердого гидроксида калия высаждали осадок феррата калия.

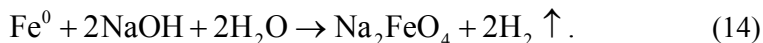
Третий способ получения ферратов, предусматривающий электрохимическое окисление материала железного анода в растворе крепкой щелочи, предложен немецким ученым Поггендорфом в 1841 году. Электрохимическое окисление материала железного анода в растворе крепкой щелочи протекает следующим образом:



Анодный процесс сопряжен с электрохимической реакцией, протекающей на катоде:



Суммарное уравнение реакций электрохимического синтеза феррата натрия в растворе крепкой щелочи имеет вид:



Таким образом, еще в XIX в. работами Фреми и Поггендорфа были заложены основы трех методов получения ферратов, которые используются и в настоящее время:

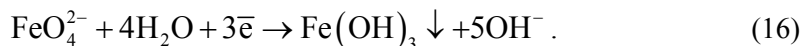
- 1) Высокотемпературное окисление (пиротехническое окисление) соединений железа, находящихся в виде порошков.
- 2) Химическое окисление соединений железа в растворах крепких щелочей.
- 3) Электрохимическое окисление соединений железа в растворах крепких щелочей.

Для деструктивной очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод предпочтительно использовать феррат натрия, поскольку его растворимость в крепких щелочных растворах значительно превышает растворимость феррата калия. Будучи сильным окислителем, феррат натрия легко окисляет загрязнения сточных вод. Величина окислительно-восстановительного потенциала феррат-ионов в значительной степени зависит от уровня pH обрабатываемых сточных вод.

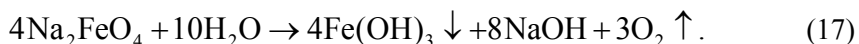
В кислой среде уровень окислительного потенциала феррат-ионов достигает значения $E^0 = +2,2\text{В}$:



В нейтральной и щелочной среде феррат-ион имеет значительно меньшую величину окислительного потенциала $E^0 = +0,7\text{В}$:



Поскольку феррат натрия является сильным окислителем, в водных растворах он быстро разлагается с выделением кислорода:



В настоящее время в различных странах мира стало появляться все больше различных исследовательских групп, тематика работ которых связана с процессами обеззараживания и окисления загрязнений природных и сточных вод феррат-ионами.

В [5] приводятся данные о том, что количество патентов, посвящённых ферратной тематике и выдаваемых в мире в течение года, выросло с 5 в 1982 году до 180 патентов в 2012 году.

В [6] описаны экспериментальные исследования кинетики процесса разложения феррата натрия в растворе гидроксида натрия, которые позволили установить, что при температуре $t=20^\circ\text{C}$ период полураспада феррата натрия в 40 % растворе NaOH с исходной концентрацией феррата натрия $C_{\text{ф}}=5$ мг/л составляет 60 ч, а в 30 % растворе NaOH он равен 36 ч. Проведенные исследования показали, что при уменьшении концентрации гидроксида натрия процесс разложения феррата натрия существенно ускоряется.

Порошкообразный сухой феррат натрия вследствие своей нестабильности может храниться только в герметичной упаковке в отсутствие контакта с влагой воздуха, что крайне затрудняет его использование в процессе глубокой очистки сточных вод.

Получение порошкообразного феррата натрия пиротехническими способами на площадке очистных сооружений невозможно из-за высокой опасности этого процесса, связанной с необходимостью поддержания высокой температуры в процессе синтеза и с использованием взрывоопасных окислителей.

В [5] на основе проведенного литературного обзора, посвящённого технологическим процессам синтеза феррата натрия и его использования для очистки и обеззараживания природных и сточных вод, был сделан вывод о том, что наибольший интерес представляют технология получения щелочных растворов феррата натрия непосредственно на площадке очистных сооружений методом химического окисления железа гипохлоритом натрия и электрохимический способ синтеза раствора феррата натрия.

В настоящее время на мировом рынке наиболее успешной является фирма Ferrate Treatment Technologies LLC (FTT), выпускающая в промышленном масштабе модельный ряд установок синтеза щелочных растворов феррата натрия химическим способом, позволяющий удовлетворить нужды различных очистных сооружений [5].

В [7] приводится описание промышленного внедрения процесса обеззараживания балластных вод щелочным раствором феррата натрия, синтезируемым химическим способом непосредственно на судне, обрабатывающем балластные воды.

Проведенные исследования показали, что при дозах феррата натрия от 1 до 5 мг/л уменьшается количество хлоррезистентных бактерий, содержащихся в балластных водах, на 99,9 %. Использование ультразвуковой обработки обеззараживаемых вод позволило снизить рабочую концентрацию феррата натрия, обеспечивающую требуемую степень обеззараживания, до 1 мг/л. Обеззараживание сбрасываемых балластных вод производилось в проточном реакторе 350 м^3 .

В проточный реактор каждые 3 минуты добавлялось 0,4 л щелочного раствора феррата натрия, при этом расход дезинфицирующего раствора составлял 8 литров в час.

Процесс обеззараживания в проточном реакторе проводился при уровне pH балластных вод 6,8-7,2. Предварительные исследования показали, что в кислой среде (pH=3,2) и щелочной среде (pH=10,2) эффект обеззараживания существенно снижается, поскольку в кислой среде наблюдается быстрое разложение феррат-ионов, а в щелочной среде падает их окислительный потенциал [7]. Химический синтез феррата натрия проводили в ферратном реакторе. В ферратный реактор заливали раствор гипохлорита натрия NaOCl, и затем в него добавляли расчетный объем гидроксида натрия NaOH. Перемешивание в реакторе производили барботированием сжатым воздухом в течение 3 минут, после чего в него заливали раствор хлорида железа FeCl₃. В реакторе протекал процесс окисления железа(III) до железа(VI) в соответствии с уравнением реакции:



Процесс окисления железа осуществлялся в течение 10 минут.

В [8] приводятся данные, свидетельствующие об успешном использовании феррат-ионов для окисления комплексного соединения ЭТДА с металлами гальваностокков. Этилендиаминтетрауксусная кислота является комплексообразующим агентом, создающим наиболее устойчивые комплексные соединения с ионами многих металлов, включая и такие токсичные металлы, как кадмий и медь [8].

В [9] описываются процессы получения щелочных растворов феррата натрия путем электрохимической обработки в мембранном электролизере с растворимыми анодами 20 % раствора гидроксида натрия NaOH, отводимого с установки электролизного получения газообразного хлора, и его использования для обеззараживания и окисления загрязнений природных и сточных вод.

В [10-15] было отмечено, что электрохимический способ синтеза щелочного раствора феррата натрия в процессе обработки крепкого щелочного раствора в мембранном электролизере с растворимыми железными анодами является наиболее перспективным, так как для его реализации требуются всего лишь 20-40 % щелочи, железные аноды и источник постоянного напряжения.

Крепкий раствор гидроксида натрия применяется в процессе традиционной очистки сточных вод гальванических производств, содержащих ионы металлов, методом нейтрализации на локальных канализационных очистных сооружениях промышленных предприятий. Метод нейтрализационной обработки сточных вод гальванических производств, не содержащих комплексных соединений ионов металлов, предусматривает дозирование в них растворов щелочи, в результате чего увеличивается концентрация гидроксильных ионов и повышается степень гидролиза ионов металлов, в итоге происходит интенсивное образование малорастворимых гидроксидов, выпадающих в осадок в процессе отстаивания. Подщелачивание сточных вод (изменение их уровня pH) позволяет воздействовать на процесс химического равновесия ионной и молекулярной составляющих компонентов и определяет направление перехода ионизация-моляризация. Переход одной формы дисперсного состояния загрязнения сточных вод в другую форму определяет не только уровень pH, но и значение Eh сточных вод, и он может быть описан термодинамической диаграммой состояния «элемент – вода» (диаграмма Пурбе). Проводя электрохимическую активизацию в мембранном электролизере с растворимыми железными анодами части объема раствора крепкой щелочи, используемой при нейтрализационной очистке сточных вод, можно не только осуществить коррекцию pH, но и повысить Eh очищаемых сточных вод, что позволит интенсифицировать работу локальных очистных сооружений промышленных предприятий.

Таким образом, проведенный литературный обзор технологических процессов синтеза высокоактивных реагентов позволил сделать следующие выводы:

1. Наиболее перспективной с экономической и экологической точек зрения является технология интенсификации процесса нейтрализационной очистки сточных

вод гальванопроизводств, не содержащих в своем составе комплексных соединений, за счет активационной обработки части объема раствора гидроксида натрия в мембранном электролизере с растворимыми железными анодами.

2. Наибольший интерес представляет использование феррата натрия в технологических процессах деструктивной очистки и обеззараживания сточных вод (растворимость в крепком щелочном растворе феррата натрия существенно превышает растворимость феррата калия).

3. Низкая стабильность щелочного раствора феррата натрия обуславливает необходимость разработки технологического процесса синтеза этого реагента-окислителя непосредственно на площадке канализационных очистных сооружений.

4. Удовлетворительным методом промышленного синтеза щелочного раствора феррата натрия на площадках канализационных очистных сооружений является электрохимическое окисление материала железного анода в 30-40 % растворе гидроксида натрия в электролизере с неселективной мембраной.

Список литературы

1. Кофман, В.Я. Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод (часть 1) (обзор зарубежных изданий) / В.Я. Кофман // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – №10. – С.68–78.
2. Кофман, В.Я. Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод (часть 2) (обзор зарубежных изданий) / В.Я. Кофман // Водоснабжение и санитарная техника.-2013.-№11. – С.70–80.
3. Желовицкая, А.В. Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическими электрохимическими методами / А.В. Желовицкая, Е.А. Ермолаева, А.Ф. Дресвянников // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – №6. – С.211–229.
4. Рылов, Ю.Б. Аппаратурно-технологическое оформление процессов само распространяющегося синтеза ферратов(VI) щелочных металлов для продуктов регенерации воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / Ю.Б. Рылов. – Тамбов, 2012. – С. 152.
5. Брунман, В.Е. Применение феррата натрия в водоподготовке: исследования, разработки, практика применения / В.Е. Брунман, М.В. Брунман, В.А. Дьяченко, Р.Э. Некрасов, А.П. Петкова // Вода Magazine. – 2018. – № 4 (128). – С. 38–43.
6. Андреев, С.Ю. Исследование кинетики процесса разложения ферратов в растворах гидроксида натрия, прошедших электроактивационную обработку / С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, А.А. Князев, М.С. Долгушев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №2. – С.150–156.
7. Laksono, Fajar Budi. System and eco-material design based on slow-release ferrate(VI) combined with ultrasound for ballast water treatment / Fajar Budi Laksono, Dian Majid, Aditya Rio Prabowo // Open Engineering. – 2022. – №12(1). – P.401–408.
8. Sailo, Lalsaimawia. Efficient use of ferrate(VI) for the remediation of wastewater contaminated with metal complexes / Lalsaimawia Sailo, Lalramnghaki Pachuau, Jae Kyu Yang, SeungMok Lee, Diwakar Tiwari // Environmental Engineering Research. – 2015. – №20(1). – P.89–97.
9. Аракчеев, Е.Н. Экспериментальное обоснование целесообразности обеззараживания и очистки воды и стоков ферратом натрия / Е.Н. Аракчеев, В.Е. Брунман, М.В. Брунман, А.В. Коняшин, В.А. Дьяченко, А.П. Петкова, Р.Э. Некрасов // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 3. – С. 216–222.
10. Киреев, С.Ю. Исследование эффективности применения электрохимического модуля генерации ферратов при очистке сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / С.Ю. Киреев, В.Н. Штепа, С.Н. Киреева, А.В. Козырь, А.Б. Шикунец, Л.В. Наумов // Химическая технология. – 2024. – № 2. – С.67–74.

11. Перфильев, Ю.Д. Новая ферратная технология очистки воды / Ю.Д. Перфильев, Л.А. Куликов, С.К. Дедушенко. – М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2004. – 8 с.
12. Дедушенко, С.К. Некоторые практические аспекты ферратной технологии обработки воды / С.К. Дедушенко, Ю.Д. Перфильев, Л.А. Куликов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 3 (77).
13. Петкова, А.П. Выбор материалов и технологий для реактора электрохимического синтеза / А.П. Петкова, С.М. Горбатьюк, Г.Р. Шафутдинова, В.А. Наговицын // Металлург. – 2024. – №3. – С.107–113.
14. Fremy, E. Recherches sur l'action des peroxides alcalins sur les oxides metalliques / E. Fremy // Compt. Rend. Acad. Sci. – 1841. – 12. – P.23–24.
15. Андреев, С.Ю. Исследование технологического процесса электрохимического синтеза феррата натрия в анодных ячейках мембранного электролизера / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А., Князев, М.С. Долгушев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №2. – С.142–149.
16. Fremy, E. Recherches sur les acides metalliques / E. Fremy // Compt. Rend. Acad. Sci. 1842, 14, 442–446. Fremy, E. Recherches sur les acides metalliques / E. Fremy // Ann. Chim. Phys. – 1844. – 12. – P.361–382.
17. Smith, J.D. On the composition of an acid oxide of iron (ferric acid) / J.D. Smith // Phil. Mag. – 1843. – 23. – P. 217–225.
18. Wittstein, G.C. Beitrag zur Bildung und Darstellung der Eisensäure / G.C. Wittstein // Repertor. Pharm. – 1845. – 89 (39). – P. 176–179.
19. Thompson, G.W. Preparation and purification of potassium ferrate VI / G.W. Thompson, L.T. Ockerman, J.M. Schreyer // J. Amer. Chem. Soc. – 1951. – 73. – P.1379–1381.
20. Poggendorff, J.C. Ueber die Frage, ob es wirksame galvanische Ketten ohne primitive chemische Actionen gebe, und über die Bildung der Eisensäure auf galvanischem Wege / J.C. Poggendorff // Ann. Phys. Chem. – 1841. – 130 (54). – P.353–377.

References

1. Kofman, V.Ya. New oxidation technologies for water and wastewater treatment (part 1) (review of foreign publications) / V.Ya. Kofman // Water supply and sanitary engineering. – 2013. – №10. – P.68–78.
2. Kofman, V.Ya. New oxidation technologies for water and wastewater treatment (part 2) (review of foreign publications) / V.Ya. Kofman // Water supply and sanitary engineering. – 2013. – №11. – P.70–80.
3. Zhelovitskaya, A.V. Oxidation of organic compounds using hydroxide radical generated in solutions by chemical and electrochemical methods / A.V. Zhelovitskaya, E.A. Ermolaeva, A.F. Dresvyannikov // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2008. – No. 6. – P. 211–229.
4. Rylov, Yu.B. Hardware and technological design of processes of self-propagating synthesis of ferrates (VI) of alkali metals for air regeneration products: Abstract of the dis. ... of candidate of sciences in the specialty 05.17.08 «Processes and apparatuses of chemical technologies» / Yu. B. Rylov. – Tambov, 2012. – P. 152.
5. Brunman, V.E. Application of sodium ferrate in water treatment: research, development, application practice / V.E. Brunman, M.V. Brunman, V.A. Dyachenko, R.E. Nekrasov, A.P. Petkova // Water Magazine. – 2018. – No. 4 (128). – P. 38–43.
6. Andreev, S.Yu. Study of the kinetics of the decomposition process of ferrates in sodium hydroxide solutions subjected to electroactivation treatment / S.Yu. Andreev, N.N. Laskov, A.A. Knyazev, M.S. // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2. – P. 150–156.
7. Laksono, Fajar Budi. System and eco-material design based on slow-release ferrate(VI) combined with ultrasound for ballast water treatment / Fajar Budi Laksono, Dian Majid, Aditya Rio Prabowo // Open Engineering. – 2022. – №12(1). – P.401–408.

8. Sailo, Lalsaimawia. Efficient use of ferrate(VI) for the remediation of wastewater contaminated with metal complexes / Lalsaimawia Sailo, Lalramnghaki Pachuau, Jae Kyu Yang, SeungMok Lee, Diwakar Tiwari // *Environmental Engineering Research*. – 2015. – №20(1). – P.89–97.
9. Arakcheev, E.N. Experimental substantiation of the feasibility of disinfection and purification of water and wastewater with sodium ferrate / E.N. Arakcheev, V.E. Brunman, M.V. Brunman, A.V. Konyashin, V.A. Dyachenko, A.P. Petkova, R.E. Nekrasov // *Hygiene and Sanitation*. – 2017. – Vol. 96, No. 3. – P. 216–222.
10. Kireev, S.Yu. Study of the efficiency of using an electrochemical module for generating ferrates in the treatment of wastewater from meat processing plants / S.Yu. Kireev, V.N. Shtepa, S.N. Kireeva, A.V. Kozyr, A.B. Shikunets, L.V. Naumov // *Chemical Technology*. – 2024. – No. 2. – P. 67–74.
11. Perfil'ev, Yu. D. New ferrate technology for water purification / Yu. D. Perfil'ev, L. A. Kulikov, S. K. Dedushenko. – M.: Moscow State University, 2004. – 8 p.
12. Dedushenko, S.K. Some practical aspects of ferrate technology for water treatment / S.K. Dedushenko, Yu.D. Perfil'ev, L.A. Kulikov // *Energy Saving and Water Treatment*. – 2012. – No. 3 (77).
13. Petkova, A.P. Selection of materials and technologies for an electrochemical synthesis reactor / A.P. Petkova, S.M. Gorbatyuk, G.R. Shafutdinova, V.A. Nagovitsyn // *Metallurg*. – 2024. – No.3. – P.107–113.
14. Fremy, E. Recherches sur l'action des peroxides alcalins sur les oxides métalliques / E. Fremy // *Compt. Rend. Acad. Sci.* – 1841. – 12. – P.23–24.
15. Andreev, S.Yu. Study of the technological process of electrochemical synthesis of sodium ferrate in the anode cells of a membrane electrolyzer / S.Yu. Andreev, I.A. Garkina, A.A., Knyazev, M.S. Dolgushev // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – No. 2. – P.142–149.
16. Fremy, E. Recherches sur les acides métalliques / E. Fremy // *Compt. Rend. Acad. Sci.* 1842, 14, 442–446. Fremy, E. Recherches sur les acides métalliques / E. Fremy // *Ann. Chim. Phys.* – 1844. – 12. – P.361–382.
17. Smith, J.D. On the composition of an acid oxide of iron (ferric acid) / J.D. Smith // *Phil. Mag.* – 1843. – 23. – P. 217–225.
18. Wittstein, G.C. Beitrag zur Bildung und Darstellung der Eisensäure / G.C. Wittstein // *Repertor. Pharm.* – 1845. – 89 (39). – P. 176–179.
19. Thompson, G.W. Preparation and purification of potassium ferrate VI / G.W. Thompson, L.T. Ockerman, J.M. Schreyer // *J. Amer. Chem. Soc.* – 1951. – 73. – P.1379–1381.
20. Poggendorff, J.C. Ueber die Frage, ob eine wirksame galvanische Kette ohne primitive chemische Action gegeben, und über die Bildung der Eisensäure auf galvanischem Wege / J.C. Poggendorff // *Ann. Phys. Chem.* – 1841. – 130 (54). – P.353–377.

Калининградский государственный
технический университет

Россия, 236022, г. Калининград,
Советский пр., 1

Великанов Николай Леонидович,
доктор технических наук, зав. кафедрой
«Судостроение, судоремонт и морская
техника»

E-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru

Наумов Владимир Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Техносферная безопасность
и природообустройство»

E-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

Kaliningrad State Technical University

Russia, 236022, Kaliningrad, 1,
Sovetskiy Ave

Velikanov Nikolaj Leonidovich,
Doctor of Sciences, Head of the Department
«Shipbuilding, Ship Repair and Marine
Engineering»

E-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru

Naumov Vladimir Arkad'evich,
Doctor of Sciences, Professor of the
Department «Technosphere Safety and
Environmental Engineering»

E-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru

РАСХОД ВОЗДУХА ТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛЬЮ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МУСОРОУДАЛЕНИЯ

Н.А. Великанов, В.А. Наумов

Метод определения расчета производительности вакуумного насоса, ранее разработанный для локальной системы транспортировки твердых частиц, усовершенствован применительно к пакетам с мусором. Исследовано влияние диаметра трубопровода, размера пакета на скорость витания, диаметра трубопровода на потребный расход воздуха. Показано, что условие достаточности величины объемного расхода воздуха в транспортном трубопроводе необходимо проверить лишь на входе. Разработан метод расчета производительности вакуумного насоса при изменении диаметра транспортной трубы, размера, плотности и формы пакета с мусором.

Ключевые слова: вакуумная система мусороудаления, размер пакета, скорость витания, транспортная труба, расход воздуха

AIR CONSUMPTION BY THE TRANSPORT LINE OF A VACUUM WASTE DISPOSAL SYSTEM

N.L. Velikanov, V.A. Naumov

The method for determining the calculation of the performance of a vacuum pump, previously developed for a local solid particles transportation system, has been improved in relation to garbage bags. The influence of the pipeline diameter, the package size on the soaring speed, and the pipeline diameter on the required air flow is investigated. It is shown that the condition of sufficiency of the volume air flow in the transport pipeline must be checked only at the inlet. A method has been developed for calculating the performance of a vacuum pump when changing the diameter of a transport pipe, the size, density and shape of a garbage bag.

Keywords: vacuum waste disposal system, package size, soaring speed, transport pipe, air consumption

Введение

Вакуумная система мусороудаления (ВСМ) является на сегодняшний день современной высокотехнологичной системой работы с мусором, включая твердые бытовые отходы [1–7].

В статье [1] смоделирована корабельная система ВСМ, и кратко представлены расчеты потерь давления в трубопроводе, степени разрежения, описана экспериментальная платформа имитационного устройства. Главные ее преимущества – полностью

закрытый сбор и транспортировка мусора, устранение перекрестного загрязнения, экономия пространства.

Мусорные системы, использующие вакуумный насос и пневматические трубы для удаления мусора из жилых домов и урн на тротуарах, существуют уже несколько десятилетий; все большую популярность они набирают в США, обслуживают Диснейленд и остров Рузвельта на Манхэттене и обеспечивают более чистый и экологичный вывоз отходов¹.

Для анализа работы пневматической системы транспортировки мусора был использован численный метод [2].

В статье [3] рассматриваются вопросы воздействия на окружающую среду города пневмотранспорта для вывоза твердых бытовых отходов. Указаны недостатки обычного сбора и транспортировки (контейнер-мусоровоз), основным из которых является выброс парниковых газов в атмосферу города (метан, аммиак, соединения серы). Эти проблемы могут быть устранены пневмотранспортом, который собирает и перемещает отходы с помощью воздушного потока в подземном трубопроводе. Как показали проведенные исследования, одним из перспективных направлений развития утилизации городских отходов является использование комбинированной пневматической системы забора-нагнетания. Исследованиями установлено, что для улучшения очистки воздуха, удаляемого из трубопровода, в качестве фильтра последней ступени целесообразно использовать фотокаталитическую очистку [3].

Однако многие существующие свалки твердых бытовых отходов исчерпали свои возможности по переработке мусора, и новые объекты сталкиваются с проблемой размещения. Подход, обсуждаемый в [4], представляет собой усовершенствованную концепцию захоронения отходов, которая предполагает последовательное применение анаэробной деградации, аэробного разложения, а также использование свалочного газа для производства энергии.

Главный недостаток ВСМ – высокая стоимость как капитальных, так и эксплуатационных затрат. Поэтому большой интерес вызывают направления усовершенствования ВСМ, позволяющие снизить стоимостные показатели. Как правило, компаниями² предлагаются ВСМ с $D=500$ мм. Но, например, компания MetroTaifun³ внедряет ВСМ с транспортными магистралями уменьшенного диаметра D . На рис. 1 показано, что снижение диаметра ВСМ до $D=300$ мм позволяет уменьшить потребный расход воздуха Q с 14000 до 5000 м³/час. При этом мощность типового вакуумного насосного оборудования снижается с 600 до 150 кВт, но только при неизменной скорости движения воздуха $U=20$ м/с. Для уменьшения размера пакетов с мусором d применяется специальное устройство – форматор.

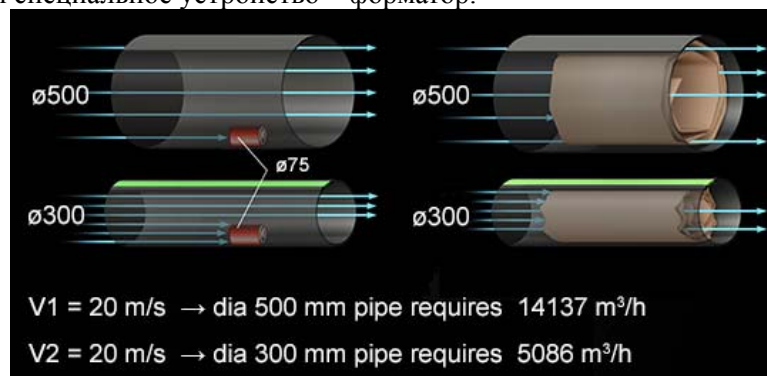


Рис. 1. Оценка расхода воздуха в транспортной магистрали ВСМ (компания MetroTaifun)

¹ Kingson J.A. Sending garbage underground by pneumatic tube. Economy. 2020. URL: <https://www.axios.com/2020/10/29/garbage-underground-pneumatic-tube> (дата обращения: 06.03.2024).

² Puzer. Vacuum waste collection and disposal systems. URL: <http://puzer.pro/services/> (date of application: 13.02.2024).

³ MetroTaifun. Automatic waste collection and transportation system. URL: https://metrotaiFun.com/automatic_solid_waste_collection_system/ (date of application: 15.02.2024).

Однако такой подход не учитывает, что изменение размера пакета d и его плотности ρ влечет изменение скорости W , необходимой для его транспортировки, а значит, и Q .

Цель нашего исследования – разработать метод расчета производительности вакуумного насоса при изменении диаметра транспортной трубы, размера, плотности и формы пакета с мусором.

Материалы и методы

Крайне мало конкретных расчетов параметров ВСМ. В публикациях отсутствует обоснование выбора характеристик вакуумных установок для ВСМ, а многие положения устарели. Согласно [8] величина скорости транспортирующего воздуха в трубопроводе U должна быть не менее скорости витания частиц мусора W (25...32 м/с).

На сайте компания MetroTaifun указано, что скорость U увеличивается при росте диаметра трубы: $U = 24...27$ м/с при $D=450$ мм; $U = 26...30$ м/с при $D=500$ мм; $U = 28...32$ м/с при $D=600$ мм. Правда, никакого обоснования не приводится.

В квадратичной области сопротивления формула для скорости витания W имеет следующий вид [9–11]:

$$W = \sqrt{\frac{2mg}{C_x S \rho_a}}, \quad (1)$$

где m – масса тела, кг; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления тела; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – площадь наибольшего поперечного сечения тела, м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Результаты изучения плотности опубликованы, например, в [6, 12], где указано, что без сжатия бытовой мусор (в пакетах) может иметь плотность от 60 до 120 кг/м³. После пресса эта плотность может достигать 700 кг/м³ и выше.

Коэффициент аэродинамического сопротивления можно представить в виде произведения:

$$C_x = C_{x0} \cdot \Gamma_\delta \cdot \Gamma_\xi, \quad (2)$$

где C_{x0} – коэффициент аэродинамического сопротивления сферического тела, в квадратичной области сопротивления принимается $C_{x0} \approx 0,44$; Γ_δ , Γ_ξ – безразмерные поправочные коэффициенты.

Коэффициент, обусловленный стесняющим влиянием стенок трубы, может быть рассчитан по эмпирической формуле [9]:

$$\Gamma_\delta = 1/(1 - \delta_2)^3, \quad \delta = d/D. \quad (3)$$

Коэффициент, обусловленный несферической формой тела, может быть рассчитан по эмпирической формуле [10, 11]:

$$\Gamma_\xi = 10 - 9/\xi, \quad (4)$$

где ξ – геометрический коэффициент формы, равный отношению площади поверхности тела к площади поверхности сферы равного объема (с эквивалентным диаметром de).

Выразим массу тела m и площадь наибольшего поперечного сечения S через эквивалентный диаметр:

$$m = \rho \cdot \pi \cdot de^3/6, \quad S = \pi \cdot de^2/4. \quad (5)$$

Подставив (2)–(5) в (1), получим

$$W = \sqrt{\frac{4g \cdot de \cdot \rho}{3 \cdot C_{x0} \Gamma_\xi(\xi) \cdot \Gamma_\delta(de/D) \cdot \rho_a}}. \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показано влияние увеличения диаметра трубопровода на скорость витания элементов отходов определенного размера. По формуле (3) возрастание величины D при фиксированном значении de приводит к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления, что по (6) влечет уменьшение скорости витания W . С увеличением плотности и размеров элементов скорость W растет. Такое изменение качественно согласуется с рекомендациями компании MetroTaifun для скорости транспортирующего воздуха U (см. выше).

Плотности, показанные на рис. 2, характерны для частиц отходов, транспортируемых россыпью. В современных ВСМ по транспортной трубе перемещаются пакеты с мусором, плотность которых много меньше.

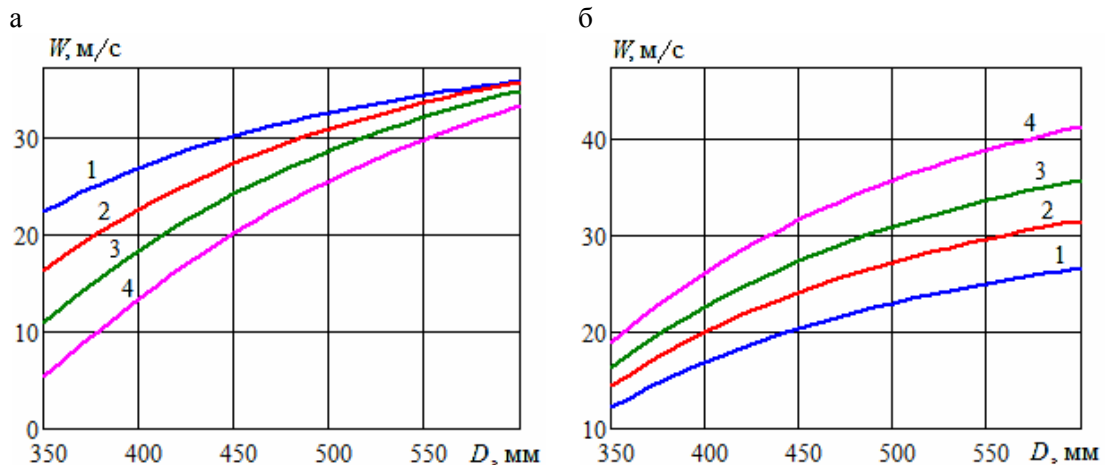


Рис. 2. Влияние диаметра трубопровода на скорость витания при $\xi=1,2$:

а – $\rho=900 \text{ кг/м}^3$, 1 – $de=210 \text{ мм}$; 2 – $de=250 \text{ мм}$; 3 – $de=280 \text{ мм}$; 4 – $de=310 \text{ мм}$;
б – $de=250 \text{ мм}$, 1 – $\rho=500 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho=700 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho=900 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$

На рис. 3 представлена зависимость скорости витания пакетов от их размера при разных значениях δ и ξ . Видно, что чем сильнее форма пакета отличается от сферической, тем меньше скорость витания (рис. 3,а); уменьшение размера пакета приводит к росту скорости витания (рис. 3,б).

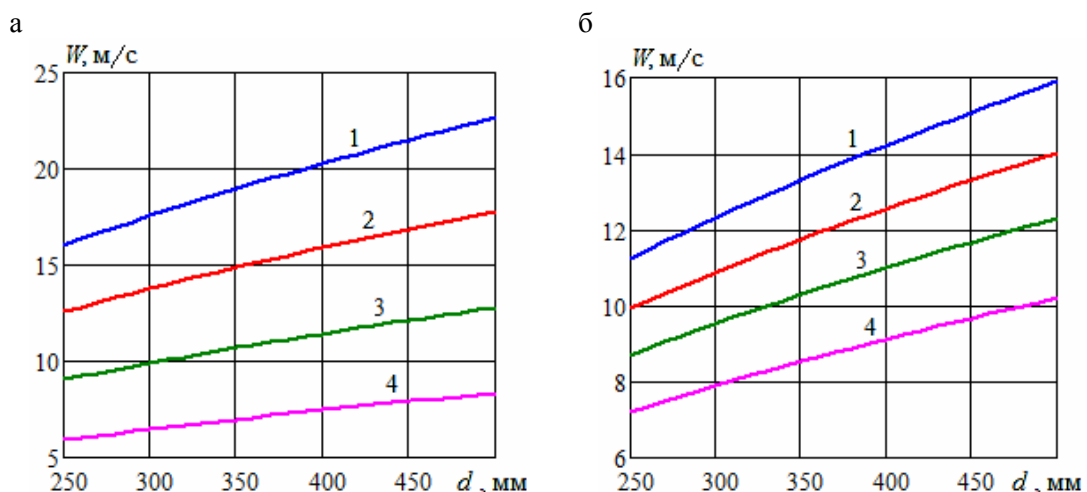


Рис. 3. Влияние размера пакета на скорость витания при $\rho=90 \text{ кг/м}^3$:

а – $\xi=1,1$; 1 – $\delta=0,25$; 2 – $\delta=0,45$; 3 – $\delta=0,6$; 4 – $\delta=0,72$;
б – $\delta=0,6$; 1 – $\xi=1,02$; 2 – $\xi=1,06$; 3 – $\xi=1,12$; 4 – $\xi=1,26$

Форматор, сминая пакеты с мусором, уменьшает их размеры и увеличивает плотность. Примем в первом приближении, что плотность увеличивается прямо пропорционально квадрату отношения эквивалентных диаметров:

$$\rho = \rho_b \cdot (db/de)^2, \quad (7)$$

где ρ_b , db – базовая плотность и базовый эквивалентный диаметр пакета с мусором (до сжатия в форматоре).

Подставим (7) в формулу (6) и учтем, что $de = \delta \cdot D$:

$$W = \sqrt{\frac{4g \cdot \rho_b \cdot db^2}{3 \cdot C_{x0} \Gamma_\xi(\xi) \cdot \Gamma_\delta(\delta) \cdot \delta \cdot D \cdot \rho_a}}. \quad (8)$$

По формуле (7) можно оценить влияние диаметра трубопровода на скорость витания при изменении значений ξ и δ . Результаты расчета представлены на рис. 4 и 5.

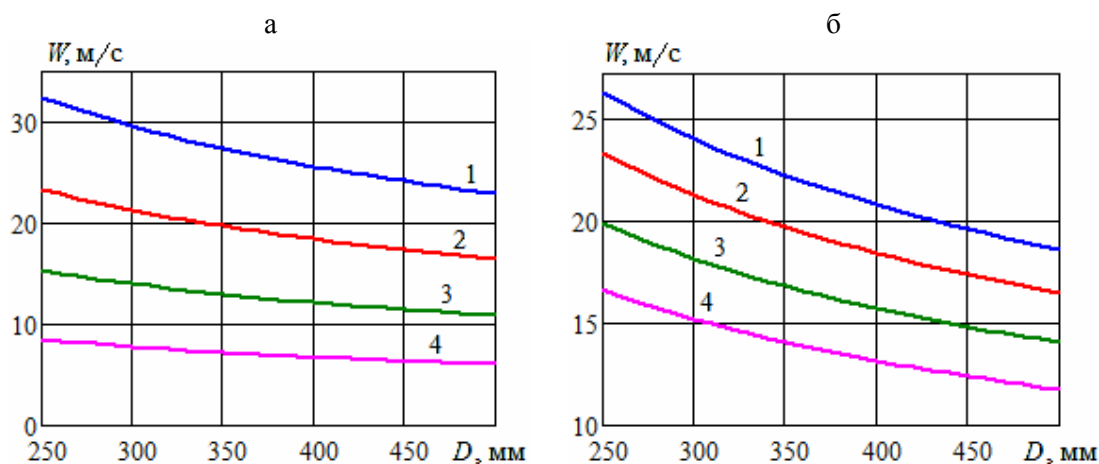


Рис. 4. Влияние диаметра трубопровода на скорость витания при $\rho_b = 90 \text{ кг/м}^3$:

а – $\xi = 1,1$; 1 – $\delta = 0,5$; 2 – $\delta = 0,6$; 3 – $\delta = 0,7$; 4 – $\delta = 0,8$;

б – $\delta = 0,6$; 1 – $\xi = 1,05$; 2 – $\xi = 1,1$; 3 – $\xi = 1,2$; 4 – $\xi = 1,4$

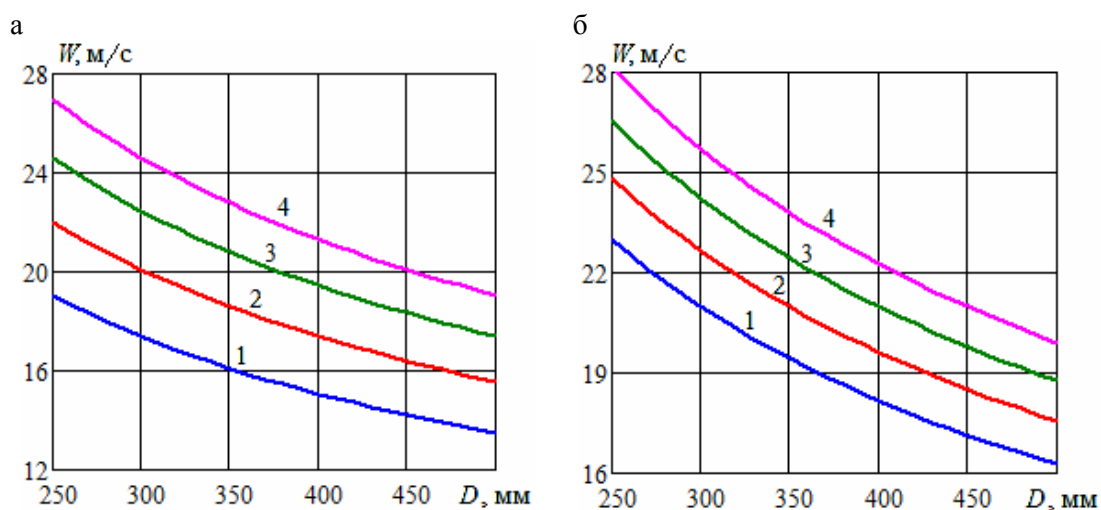


Рис. 5. Влияние диаметра трубопровода на скорость витания при $\delta = 0,6$:

а – $\xi = 1,1$; 1 – $\rho_b = 60 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho_b = 80 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho_b = 100 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho_b = 120 \text{ кг/м}^3$;

б – $\xi = 1,2$; 1 – $\rho_b = 120 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho_b = 140 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho_b = 160 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho_b = 180 \text{ кг/м}^3$

Объемный расход воздуха в транспортном трубопроводе должен быть не менее

$$Q = W \cdot S_p = \frac{\pi D^{1,5}}{4} \sqrt{\frac{4g \cdot \rho_b \cdot db^2}{3 \cdot C_{x0} \Gamma_\xi(\xi) \cdot \Gamma_\delta(\delta) \cdot \delta \cdot \rho_a}}. \quad (9)$$

Из-за изменения давления вдоль транспортного трубопровода нельзя полагать постоянным объемный расход. Постоянным остается массовый расход воздуха $G = \rho_a Q$. Силу аэродинамического сопротивления, действующую на пакет в потоке воздуха, можно записать так:

$$FA = 0,5 C_x G \cdot S \cdot W. \quad (10)$$

В соответствии с уравнениями газодинамики скорость движения воздуха вдоль оси трубы постоянного диаметра возрастает. Откуда сила аэродинамического сопротивления, действующая на пакет, будет увеличиваться вдоль трубопровода. Поэтому условие достаточности величины объемного расхода воздуха в транспортном трубопроводе достаточно проверить лишь на входе. Значит, в формуле (9) можно принять плотность воздуха, как при атмосферном давлении, $\rho_a = 1,18 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 6 и 7 показано влияние диаметра трубопровода на потребный расход воздуха для ВСМ с форматором при различных значениях δ , ξ и базовой плотности ρb . Действительно, с уменьшением диаметра транспортного трубопровода расход воздуха уменьшается.

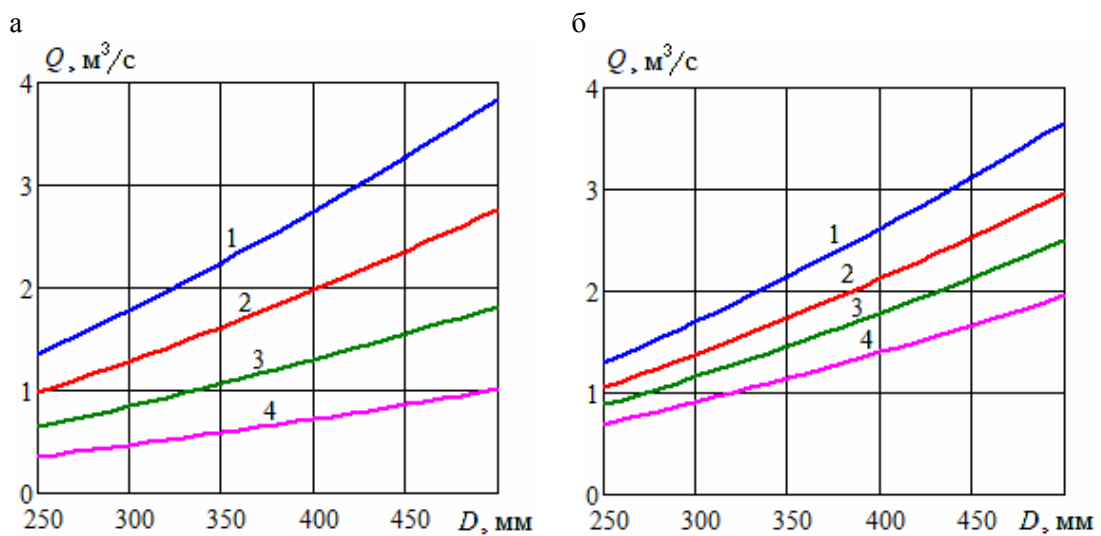


Рис. 6. Влияние диаметра трубопровода на потребный расход воздуха при $\rho b = 90 \text{ кг/м}^3$:

а – $\xi = 1,2$; 1 – $\delta = 0,5$; 2 – $\delta = 0,6$; 3 – $\delta = 0,7$; 4 – $\delta = 0,8$;

б – $\delta = 0,6$; 1 – $\xi = 1,05$; 2 – $\xi = 1,1$; 3 – $\xi = 1,2$; 4 – $\xi = 1,4$

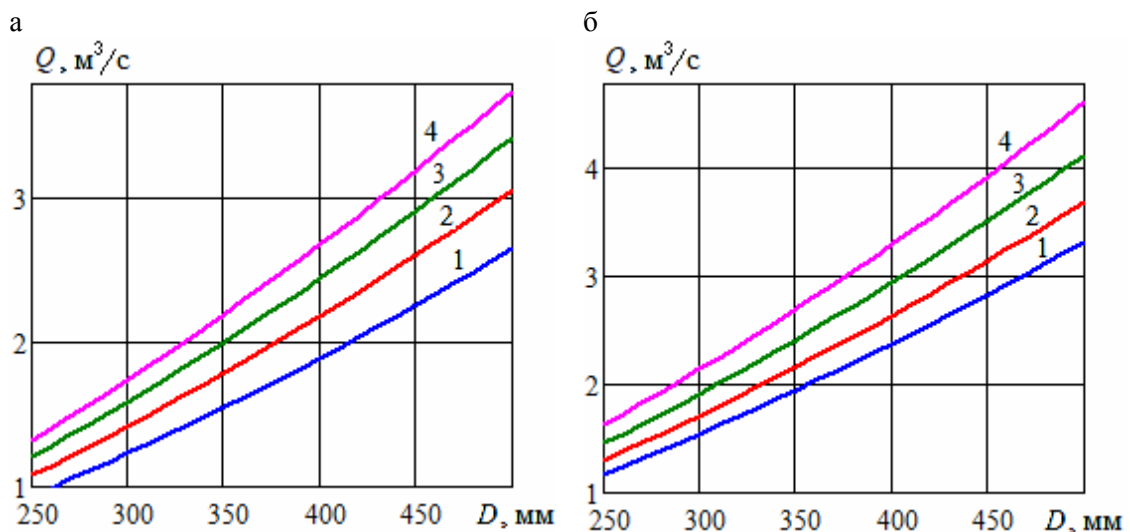


Рис. 7. Влияние диаметра трубопровода на потребный расход воздуха при $\delta = 0,6$:

а – $\xi = 1,1$; 1 – $\rho b = 60 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho b = 80 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho b = 100 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho b = 120 \text{ кг/м}^3$;

б – $\xi = 1,2$; 1 – $\rho b = 130 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho b = 160 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho b = 200 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho b = 250 \text{ кг/м}^3$

Заключение

Потребный расход воздуха для ВСМ существенно зависит от плотности, формы пакетов и их относительного размера δ .

Например, скорость витания пакета плотностью 350 кг/м^3 с эквивалентным диаметром 350 мм и формой, близкой к сферической, в трубе диаметром 500 мм составляет 19,9 м/с. Потребный расход воздуха будет равен $3,9 \text{ м}^3/\text{с}$ (14 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$). Если в форматоре уменьшить размер пакета до 250 мм, увеличивая его плотность до 860 кг/м^3 , то пакет с геометрическим коэффициентом формы $\xi=1,2$ в трубе диаметром 300 мм будет иметь скорость, заметно меньшую скорость витания, – 12,4 м/с. Значит, потребуется расход воздуха $0,97 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. 3,5 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$, а не 5,1 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$, как указано на сайте компании MetroTaifun.

Список литературы

1. Jun, D. Modelling and Optimisation of Vacuum Collection System for Cruise Ship Kitchen Garbage / D. Jun, L. Ruonan, W. Xin, Z. Hang // Polish Maritime Research. – 2020. – 27(1). – P.152–161. – URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0016>.
2. Li, Z. The simplified calculation model of pneumatic garbage transportation at acceleration period in horizontal straight pipe / Z. Li, J. Li, W. Yang, J. Liang // International journal of heat and technology. – 2017. – Vol. 35, No. 3. – P. 683–687. – URL: <https://doi.org/10.18280/ijht.350330>.
3. Dotsenko, A.I. Pneumatic transportation of municipal waste – a means of improving the ecology of the city / A.I. Dotsenko, T.K. Babaev // E3S Web of Conferences. – 2023. – 403. – 04004. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340304004>.
4. Hettiaratchi, J.P. A. Sustainable Management of Household Solid Waste / J.P. A. Hettiaratchi, H.N. Hsieh, J. N. Meegoda, C. Hunte // International Journal of Environment and Waste Management. – 2010. – 6(1/2). – P.96–106. – URL: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2010.033986>.
5. Жигулина, А.Ю. Инновационные решения в проектировании систем мусороудаления для многоэтажных зданий / А.Ю. Жигулина, А.М. Пономаренко // Градостроительство и архитектура. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 4–10.
6. Соломин, И.А. Состав и свойства твердых коммунальных отходов, учитываемые при выборе технических методов обращения с отходами / И.А. Соломин, В.И. Афанасьев // Природообустройство. – 2017. – № 3. – С. 82–89.
7. Farre, J. Pneumatic urban waste collection systems: a review/ J. Farre, C. Mateu, M. Teixido, L.F. Cabeza // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/app13020877>.
8. Санитарная очистка и уборка населенных мест: справочник / А.Н. Мирный, Н.Ф. Абрамов, Д.Н. Бенъямовский [и др.]. – М: Стройиздат, 1990. – 413 с.
9. Наумов, В.А. Динамика дисперсной частицы в вязкой среде / В.А. Наумов // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 5. – С. 27–36.
10. Великанов, Н.Л. Моделирование форм твердых частиц, перемещаемых гидротранспортом / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, С.И. Корягин // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4. – С. 50–52.
11. Наумов, В.А. Зависимость силы гидродинамического сопротивления твердых частиц от показателя их несферичности / В.А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 95–104.
12. Манюхин, В.Я. Нормы накопления ТБО, их состав и свойства / В.Я. Манюхин, И.А. Иванова, М.В. Манюхин // Научный вестник Воронежского ГАСУ. – 2013. – № 1. – С 21–27.

References

1. Jun, D. Modelling and Optimisation of Vacuum Collection System for Cruise Ship Kitchen Garbage / D. Jun, L. Ruonan, W. Xin, Z. Hang // Polish Maritime Research. – 2020. – 27(1). – P.152–161. – URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0016>.

2. Li, Z. The simplified calculation model of pneumatic garbage transportation at acceleration period in horizontal straight pipe / Z. Li, J. Li, W. Yang, J. Liang // *International journal of heat and technology*. – 2017. – Vol. 35, No. 3.– P. 683–687. – URL: <https://doi.org/10.18280/ijht.350330>.
3. Dotsenko, A.I. Pneumatic transportation of municipal waste – a means of improving the ecology of the city / A.I. Dotsenko, T.K. Babaev // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – 403. – 04004. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340304004>.
4. Hettiaratchi, J.P. A. Sustainable Management of Household Solid Waste / J.P. A. Hettiaratchi, H.N. Hsieh, J. N. Meegoda, C. Hunte // *International Journal of Environment and Waste Management*. – 2010. – 6(1/2). – P.96–106. – URL: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2010.033986>.
5. Zhigulina, A.Yu. Innovative solutions in the design of waste disposal systems for multi-storey buildings / A.Yu. Zhigulina, A.M. Ponomarenko // *Urban planning and architecture*. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 4–10.
6. Solomin, I.A. Composition and properties of solid municipal waste, taken into account when choosing technical methods of waste management / I.A. Solomin, V.I. Afanasyev // *Environmental management*. – 2017. – No. 3. – P. 82–89.
7. Farre, J. Pneumatic urban waste collection systems: a review/ J. Farre, C. Mateu, M. Teixido, L.F. Cabeza // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/app13020877>.
8. Sanitary cleaning and cleaning of populated areas: handbook / A.N. Mirny, N.F. Abramov, D.N. Benyamovsky [etc.]. – M: Stroyizdat, 1990. – 413 p.
9. Naumov, V.A. Dynamics of a dispersed particle in a viscous medium / V.A. Naumov // *Mathematical modeling*. – 2006. – Vol. 18, No. 5. – P. 27–36.
10. Velikanov, N.L. Modeling of forms of solid particles transported by hydraulic transport / N.L. Velikanov, V.A. Naumov, S.I. Koryagin // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2014. – No. 4. – P. 50–52.
11. Naumov, V.A. Dependence of the hydrodynamic resistance of solid particles on their non-spherical index / V.A. Naumov // *Bulletin of Science and education of the North-West of Russia*. – 2015. – Vol. 1, No. 1. – P. 95–104.
12. Manokhin, V.Ya. Norms of accumulation of solid waste, their composition and properties / V.Ya. Manyukhin, I.A. Ivanova, M.V. Manukhin // *Scientific Bulletin of Voronezh GASU*. – 2013. – No. 1. – P. 21–27.

АРХИТЕКТУРА

ARCHITECTURE

УДК 719:711.4

DOI 10.54734/20722958_2024_4_198

*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

Соколова Наталья Владимировна,
кандидат архитектуры, доцент кафедры
«Градостроительство»

E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru

*ООО Мордовский научно-
реставрационный центр «СИЯЖАР»*

Россия, 430011, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Степана Разина,
д. 19, пом. 9,
тел.: 8(904) 264-04-70

Косарева Валерия Дмитриевна,
архитектор
E-mail: lerakosareva29@gmail.com.

*Penza State University of Architecture
and Construction*

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

Sokolova Natalia Vladimirovna,
Candidate of Architecture, Assistant Professor
of the Department «Urban Planning»

E-mail: sok.natali.2015@yandex.ru

*LLC Mordovian Scientific and Restoration
Center «SIYAZHAR»*

Russia, 430011, Republic of Mordovia,
Saransk, 19, room. 9, Stepana Razina St.,
tel.: 8(904) 264-04-70

Kosareva Valeria Dmitrievna
Architect
E-mail: lerakosareva29@gmail.com

СТАТУС ИСТОРИЧЕСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ: ОЦЕНКА ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЕНЗЫ

Н.В. Соколова, В.Д. Косарева

Определено наличие признаков исторического поселения у г. Пензы и произведена их оценка для определения возможности установления статуса исторического поселения федерального или регионального значения. Выявлены объекты исторической части города, имеющие потенциал предмета охраны исторического поселения и определена степень их сохранности. Проведена объективизация показателей ценности исторической среды, подтвержден историко-культурный потенциал г. Пензы как исторического поселения регионального значения. Сформирован реестр наиболее ценных объектов архитектурно-градостроительного наследия города, подлежащих сохранению, выполнено картирование, что может стать основой для установления границ исторического поселения и разработки зон регулирования застройки. Результаты работы могут способствовать сохранению исторического и культурного наследия города и урегулированию процесса охраны, реконструкции, реставрации и застройки его исторических территорий.

Ключевые слова: историческое поселение, охрана, предмет, региональное значение

STATUS OF A HISTORICAL SETTLEMENT: ASSESSMENT OF THE HISTORICAL AND CULTURAL POTENTIAL OF PENZA

N.V. Sokolova, V.D. Kosareva

The presence of signs of a historical settlement near the city of Penza has been determined and their assessment is carried out to determine the possibility of establishing the status of a historical

settlement of federal or regional significance. The objects of the historical part of the city that have a potential to be protected as a historical settlement are identified and the degree of their preservation is determined. The objectification of the value indicators of the historical environment is carried out, the historical and cultural potential of Penza as a historical settlement of regional significance is confirmed. A register of the most valuable objects of the architectural and urban heritage of the city subjected to preservation is formed, mapping is carried out, which can become the basis for establishing the boundaries of the historical settlement and development of control building area. The results of the work can contribute to the preservation of the historical and cultural heritage of the city and the regulation of the process of protection, reconstruction, restoration and development of its historical territories.

Keywords: historical settlement, protection, object, regional significance

Введение. Пенза – город с богатой культурной, архитектурной и градостроительной историей, которая насчитывает уже 360 лет. Но с течением времени наследие города стало утрачиваться ввиду многих факторов: недостаточное внимание к историческим объектам и практически полное отсутствие их охраны, новое строительство, малое количество работ по реконструкции, реставрации и консервации ценных объектов. Такое отношение к исторической среде г. Пензы связано с преуменьшением ее значимости современниками, несмотря на документы, отмечающие историческую ценность города. Так, например, в 1990 г. был сформирован список из 536 исторических городов и населенных мест РСФСР (Постановление коллегии Министерства культуры РСФСР от 19.02.1990 г. №12, коллегии Госстроя РСФСР от 28.02.1990 №3 и президиума Центрального совета ВООПИК от 16.02.1990 №12 (162) «Об утверждении нового списка исторических населенных мест РСФСР»), в котором г. Пенза значился как исторический город. В 2002 г. по заказу Государственного комитета Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу и Министерства культуры РФ были проведены новые работы по изучению историко-культурного наследия России (Постановление Правительства Российской Федерации от 26.11.2001 №815 «О федеральной целевой программе «Сохранение и развитие архитектуры исторических городов (2002-2010 годы)»»). Согласно этому документу город Пенза по своим характеристикам был отнесен к III категории по ценности архитектурно-градостроительного наследия – «...исторические города регионального значения, наследие которых обосновывает их выделение из общего списка и нуждается в сохранении и использовании его как градостроительного наследия».

Приказ Министерства культуры Российской Федерации и Министерства регионального развития Российской Федерации от 29.07.2010 №418/339 «Об утверждении перечня исторических поселений», в котором был сформирован новый список исторических поселений (далее – ИП), содержал в себе 41 населенный пункт. Город Пенза, как и сотни других городов, не вошел в данный перечень. После выхода данного приказа эти города утратили шанс сохранить свою среду и урегулировать ее охрану через статус исторического поселения. Вскоре после этого некоторыми исследователями, такими, как Шевченко Э.А., Никифоров А.А. [1–3], Крогиус В.Р., Емельянов А.А., Ахмедова Е.А., Вавилонская Т.В. [4–7], был поднят вопрос определения ценности и сохранения наследия исторических городов, не входящих в список ИП Минкультуры РФ, их правового статуса и нормативно-правового регулирования.

Одной из первых проблему выявления и охраны ИП подняла Э.А. Шевченко, в своих многочисленных работах изучив недостатки и недоработки законодательной системы охраны исторических городов и их наследия. Итогом этих исследований стали «Методические рекомендации оценки историко-культурной ценности поселения» под ее редакцией [8]. В данной работе, в частности, был предложен перечень ИП Российской Федерации, соответствующих выявленным исследователями критериям для последующего установления для них статуса ИП. Пенза была включена в этот список, а также были выделены несколько характеристик, определяющих ее как ИП и подлежащих охране: «линии железных дорог: Сызранско-Вяземская железная дорога (1874 г.), железная дорога «Пенза – Рузаевка» (1895 г.); здания и сооружения конца XVIII в.: дворянское собрание, дом губернатора, уездное училище, комплекс городской больницы (1830-е гг.), Народный дом (1911 г.); природный лесопарк «Засека»

и городской парк (XIX в.); краеведческий музей (1905 г.), литературный музей, музей сценического искусства им. В.Э. Мейерхольда, музей народного творчества» [8].

Значительную работу по выявлению историко-культурной ценности г. Пензы также провели краеведы Дворжанский А.И., Щукин С.И. [9–11], архитекторы Летучева О.А. [12], Соколова Н.В. [13–16], Ещин Д.В., Лапшина Е.Г., Кутай Е.П. и др. [17–20]. Однако несмотря на большое количество работ по изучению исторической и культурной ценности г. Пензы, до сих пор полноценных исследований по выявлению признаков ИП у г. Пензы (объектов исторической части города Пензы, имеющих потенциал предмета охраны ИП) и их оценке не проводилось.

Цель исследования – выявить наличие признаков ИП у г. Пензы и произвести их оценку для определения возможности установления статуса ИП федерального или регионального значения.

Методы, материалы. Согласно ст. 59 Федерального закона от 25.06.2002 №73-ФЗ «историческим поселением ... являются включенные в перечень исторических поселений федерального значения или в перечень исторических поселений регионального значения населенный пункт или его часть, в границах которых расположены объекты культурного наследия, включенные в реестр, выявленные объекты культурного наследия и объекты, составляющие предмет охраны исторического поселения». Поэтому на первом этапе были выявлены перечень объектов культурного наследия (далее – ОКН), включенных в Единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации (далее – Реестр), и объекты исторической части города Пензы, имеющие потенциал предмета охраны ИП: *«исторически ценные градоформирующие объекты* – здания и сооружения, формирующие историческую застройку и объединенные в том числе масштабом, объемом, структурой, стилем, конструктивными материалами, цветовым решением и декоративными элементами; *планировочная структура*, включая ее элементы; *объемно-пространственная структура*; композиция и силуэт застройки – соотношение вертикальных и горизонтальных доминант и акцентов; *соотношение между различными городскими пространствами* (свободными, застроенными, озелененными); *композиционно-видовые связи (панорамы)*, соотношение природного и созданного человеком окружения» (п.2 ст. 59 Федерального закона от 25.06.2002 №73-ФЗ (ред. от 19.10.2023) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации»). Для этого был проведен ретроспективный анализ планов города, натурные и историко-архивные исследования исторической застройки, графический анализ композиции и силуэтов, композиционно-видовых связей и панорам на основе картографических материалов, исторических планов и фотографий; выполнен ландшафтно-визуальный анализ существующей ситуации исторической застройки г. Пензы.

На следующем этапе была произведена оценка выявленных объектов, составляющих предмет охраны (ПО) исторического поселения, и определена их значимость для ИП с учетом степени сохранности, определен потенциальный статус ИП.

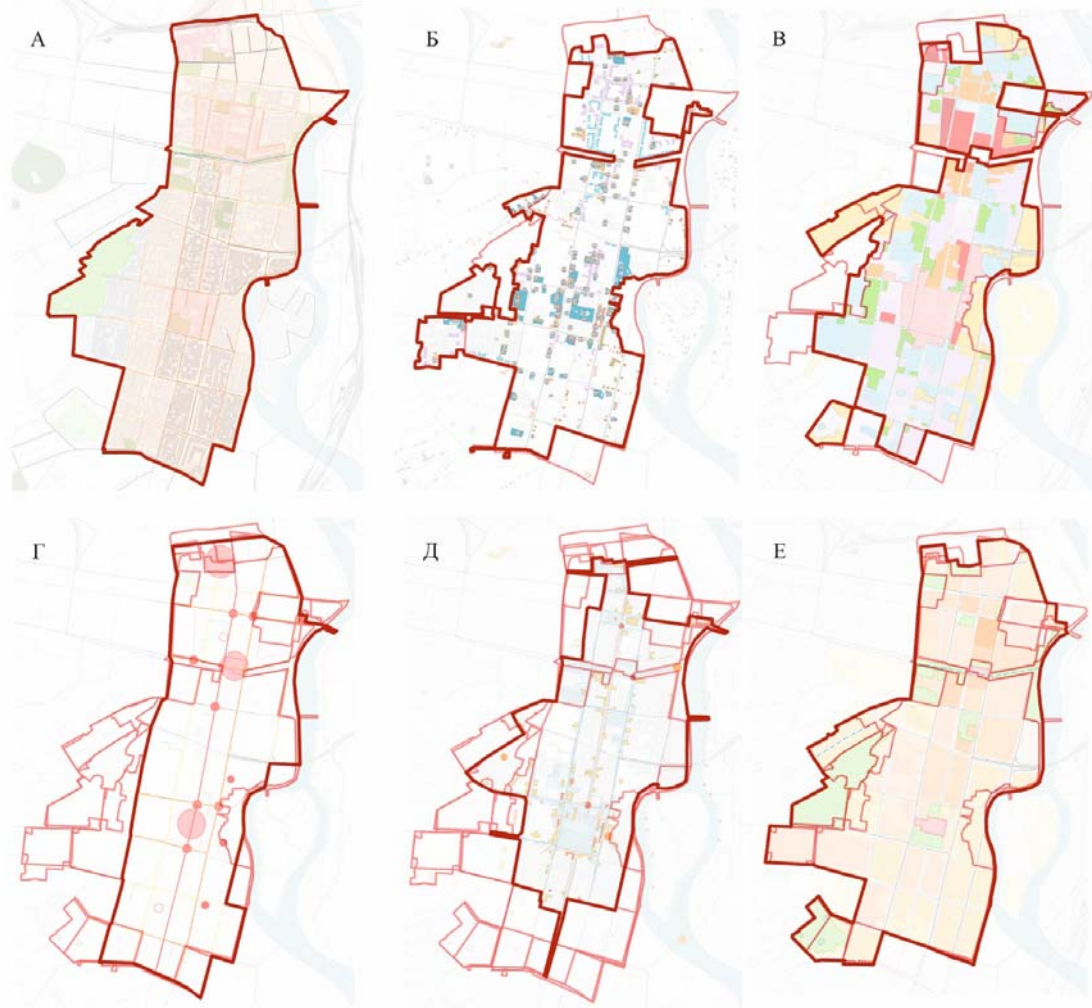
Основная часть. *Исторически ценные градоформирующие объекты* – один из основных элементов, составляющих предмет охраны ИП. Они определяют исторический облик города. В ходе исследования застройки г. Пензы были выделены ОКН и исторические здания, не имеющие официального статуса, но обладающие исторической, архитектурной, градостроительной или культурной ценностью. Оценивались как физическое наличие объектов, так и их качественное состояние (табл. 1).

Наибольшую историческую, культурную, архитектурную и градостроительную ценность для города Пензы имеют объекты, включенные в Реестр. Большая часть объектов получила статус ОКН еще в 1960–1980-е гг. При ретроспективном и натурном анализе была выявлена исторически ценная рядовая и фоновая застройка, представляющая архитектурную и градостроительную ценность для города. Строения рядовой застройки формируют фронт исторических улиц г. Пензы (улицы Бакунина, Володарского, Московская, Кирова, Кураева, Карла Маркса), а фоновая застройка благодаря своему архитектурно-декоративному решению сохраняет исторический облик города. На сегодняшний день она представлена в основном одиночными деревянными строениями конца XIX – начала XX вв. [17]. Однако несмотря на свои ценные отличительные признаки, фоновая застройка находится под риском полной утраты.

Сохранность исторически ценных градоформирующих объектов г. Пензы

ПО	Составляющие ПО	Сохранность ПО
ОКН	ОКН федерального значения: 10 объектов	90 %
	ОКН регионального значения: 124 объекта	65 %
	ОКН муниципального значения: 4 объекта	70 %
	Выявленные ОКН: 7 объектов	50 %
	Ансамбли и достопримечательные места: 4 объекта	60 %
Исторически ценная рядовая застройка	Застройка, формирующая фронт улиц; отдельные исторически и архитектурно ценные здания	40-60 %
Историческая фоновая застройка	Сохранившаяся деревянная застройка конца XIX – начала XX вв.; отдельные ценные здания	30-40 %

Исторически ценные градоформирующие объекты неравномерно сохранились на территории исторического центра: достаточно компактно они концентрируются в центральной и срединной части (см. рисунок, Б). На периферии исторического центра за последнее десятилетие историческая застройка стремительно утрачивается в результате нового строительства и представлена единичными строениями или небольшими группами.



Границы локализации объектов, обладающих потенциалом предмета охраны ИП:
 А – планировочная структура; Б – исторически ценные градоформирующие объекты;
 В – объемно-пространственная структура; Г – композиция и силуэт застройки;
 Д – композиционно-видовые связи (панорамы); Е – соотношение между различными городскими пространствами (свободными, застроенными, озелененными).

Разраб. Косарева В.Д., Соколова Н.В., 2023 г.

Планировочная структура ИП, включая ее элементы, является своеобразным «фундаментом» развития исторических объектов, их объемно-пространственной структуры, композиции ИП, создавая целостность исторической территории. В результате исследования были выявлены элементы исторической планировочной структуры г. Пензы, имеющие потенциал предмета охраны ИП. Оценивались сохранность принципов планировки, направлений и размеров улиц и площадей, наличие отклонений от прежних красных линий (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Сохранность планировочной структуры г. Пензы и ее элементов

ПО	Составляющие ПО	Сохранность ПО
Историческая пространственно-планировочная структура	Конфигурация планировочного каркаса: регулярная планировочная структура	85 %
	Система градостроительных узлов: местоположение главных исторических площадей на главной градостроительной оси	90 %
	Элементы дорегулярной планировки: фрагменты оборонительного вала XVII в.; местоположение города-крепости XVII в.; направление трассировки улиц посадов и трактов въездных дорог XVII-XIX вв.	30 %
	Параметры регулярной планировочной структуры: красные линии застройки; размер и конфигурация кварталов; основные параметры исторических улиц и площадей	60 %
Исторический природный и культурный ландшафт	Природный планировочный каркас: береговая линия реки; русло реки	40 %
	Исторический ландшафт: сохранившаяся конфигурация ландшафта	90 %
	Исторические зеленые насаждения: исторические парки; исторические бульвары, аллеи, скверы	90 %
Иные элементы планировочной структуры	Исторические железнодорожные ветки; исторические мосты; местоположение и границы исторических кладбищ	80 %

Сохранившаяся историческая планировочная структура города Пензы является примером трансформации города-крепости в город с регулярной планировкой. Наиболее примечательными в планировочной структуре г. Пензы являются сохранившиеся элементы города XVII века (до регулярной планировки): это фрагмент оборонительного вала, местоположение города-крепости и общее направление улиц посадов и дорожных трактов – нынешние ул. Московская, ул. Кирова, ул. Богданова, ул. Замойского. Наиболее выразительным элементом природного ландшафта исторической части города Пензы являются холм, на котором когда-то располагалась крепость, а сейчас – исторический центр города, и фрагмент берега реки (р. Пенза – р. Сура) от Бакунинского моста до моста Дружбы, практически не изменивший свое положение в течение более трех столетий, хотя русло рек Суры и Пензы часто изменялось вплоть до середины XX в. Наименее утраченными элементами планировочной структуры являются система градостроительных узлов – сохранившееся местоположение трех главных площадей (Соборная, Торговая и Ярмарочная (Вокзальная) площади) и историческая улично-дорожная сеть, начавшая свое формирование в соответствии с регулярным планом 1785 г. и завершившая оформление в виде застройки к концу XIX в. (см. рисунок, А).

Объемно-пространственная структура г. Пензы представляет собой пространственную организацию ценной застройки – постепенно сложившиеся в ходе роста и

развития города морфотипы, которые тоже могут являться предметом охраны. Исторические морфотипы Пензы в основном представлены исторической застройкой, сформировавшейся с XVIII в. до середины XX в. Более подробно морфотипы рассмотрены в работе «Поиск методов сохранения своеобразия российских городов (на примере г. Пензы)» [16]. При определении степени сохранности отдельных морфотипов учитывались и физическая сохранность объектов, и неизменность их первоначальных объемно-пространственных характеристик (высотности, плотности, соблюдение линии застройки и т.д.).

Т а б л и ц а 3

Сохранность объемно-пространственной структуры г. Пензы

ПО	Составляющие ПО	Сохранность ПО
Морфотипы исторической застройки	Малоэтажная застройка с приусадебными участками	30 %
	Малоэтажная разреженная застройка	40 %
	Периметрально-компактная застройка	60 %
	«Неоклассицизм»	90 %
	«Ансамбль Соборной (Советской) площади»	70 %

Наиболее сохранившимся морфотипом является «неоклассицизм», так как эта застройка относится к наиболее позднему периоду и менее остальных была подвержена изменениям. Морфотипы застройки, относящиеся к XVIII–XIX вв., в некоторых кварталах в значительной степени утрачены. Это произошло ввиду нового строительства и малого внимания к ценной исторической среде. Несмотря на имеющиеся утраты, все исторические морфотипы, характерные для города Пензы, хорошо представлены в историческом центре: на наиболее активных направлениях самый плотный морфотип застройки – периметрально-компактный, на приречных и менее урбанизированных территориях – малоэтажный с приусадебными участками, в срединной зоне – малоэтажный разреженный, на месте бывшей базарной площади – «неоклассицизм», на месте крепости – комплекс общественно-административных зданий XVIII–XIX вв. вокруг Соборной площади (табл. 3, рисунок, В).

Пространственная композиция города Пензы, определенная планом 1785 г., с двумя площадями, соединенными центральной улицей, в сочетании с ландшафтными особенностями места, была очень близка к оптимальной модели городов периода классицизма в целом [12] и приволжских городов XVIII века в частности [7]. Главной композиционной осью г. Пензы является ул. Московская, сохранившая свою трассировку с XVII в. Система второстепенных осей представляет собой линии исторических основных улиц, скверов, железнодорожных путей и водных объектов. Композиция города формировалась и развивалась на протяжении XIX–XX веков, сохраняя принципы, заложенные регулярным планом. Особую роль в композиции города играла р. Шелаховка, которая была скрыта в коллектор в XIX в. [18], однако направление русла реки было сохранено в планировке города как система скверов и бульваров. Можно сказать, что в ходе эволюционного развития пространственная композиция центра города мало изменилась. Можно утверждать, что она имеет наибольший процент сохранности по сравнению с другими предметами охраны. С другой стороны, исторические *силуэты города* подверглись большим изменениям. Силуэтные доминанты города (церкви, храмы, соборы) с течением времени были частично утрачены в результате пожаров и сносов, изменены в результате реконструкции или утрачены в результате нового строительства, появились новые современные доминанты. Вместе с тем можно отметить, что в целом сохранился характер силуэта – многоплановый силуэт города на рельефе, спускающегося к берегу реки, с историческими и современными доминантами (табл. 4). На сегодняшний день часть исторических доминант возрождены (Спасский кафедральный собор, Евлампиевская церковь-усыпальница), либо находятся в стадии возрождения (Богоявленская церковь), что положительно влияет на композицию и силуэт города.

Сохранность композиции и силуэта застройки г. Пензы

ПО	Составляющие ПО	Сохранность ПО*
Композиция ИП	Композиционные оси: улицы, железнодорожные пути, скверы, водные объекты	90 %
	Композиционные узлы: площади, перекрестки	80 %
Силуэт застройки	Исторические доминанты: церкви, соборы, монастыри	40 %
	Многоярусность	30 %

Композиционно-видовые связи (панорамы) отражают особенности визуального восприятия города. Анализ были подвергнуты следующие компоненты: бассейны визуального восприятия архитектурных доминант; панорамы и виды с путей обзора; панорамы и виды с площадок обзора; основные направления визуального восприятия; панорамные видовые точки; видовые перспективы. Характер панорам и площадь бассейнов видимости значительно изменились вследствие повышения средней этажности застройки. Наибольшей утрате подверглась основная панорама с правого берега р. Суры: фронт новой застройки перекрыл ее значительную часть. Начавшееся агрессивное освоение прибрежных территорий может привести к окончательной утрате исторических панорам. Восприятие части исторических доминант утрачено к настоящему времени, как и количество исторических видовых точек и точек восприятия, но тем не менее еще сохранилось достаточное количество видовых раскрытий, которые можно и нужно сохранять (табл. 5, рисунок Г, Д).

Т а б л и ц а 5

Сохранность исторических композиционно-видовых связей (панорам)

ПО	Сохранность ПО
Бассейн визуального восприятия архитектурных доминант	50 %
Панорамы и виды с путей и площадок обзора	40 %
Панорамные видовые точки и раскрытия	50 %

Соотношение между различными городскими пространствами – это соотношение открытых, озелененных и застроенных территорий исторической части города Пензы. В ходе исследования было выявлено, что историческая среда г. Пензы до начала XX в. развивалась равномерно и не предусматривала крупного строительства: в городе преобладала 1–3-этажная жилая и общественная застройка. На начало XX века соотношение застроенных, открытых и озеленённых пространств составляло 6:4:1. В середине XX в. на территории Базарной площади появились кварталы «неоклассической» застройки, площадь Ленина, здание областной администрации, сквер им. В.Г. Белинского и бульвар по ул. Славы. На сегодняшний день все эти изменения уже имеют историческую ценность. В районе ул. М. Горького, напротив, произошло разуплотнение застройки: здесь появились два сквера и фонтан. Таким образом, территории были уплотнены за счет уменьшения площади открытых пространств, но при этом значительно разуплотнены путем увеличения площади общественного озеленения, что привело к незначительным изменениям баланса территорий в целом: новое соотношение застроенных, открытых и озеленённых пространств составляет 6:1:2. (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Соотношения свободных, застроенных и озеленённых территорий г. Пензы

Наименование	нач. XX в. (1910 г.)		XXI в.	
	га	%	га	%
Общая площадь территории	601,97	100	608,83	100
Площадь застроенной территории, из них площадь застройки	338,68	56,3	402,53	66,1
	134,1	22,3	98,4	24,5
Площадь открытых территорий	203,01	33,7	63,49	23,5
Площадь озеленённых территорий	60,28	10	142,81	10,4

Каждая группа объектов, имеющих потенциал предмета охраны ИП, имеет разные границы локализации (см. рисунок). Картографическое отображение позволяет увидеть потенциальные границы территории ИП. Однако данный вопрос требует дополнительных исследований.

Можно утверждать, что Пенза имеет объекты, обладающие исторической и культурной ценностью и требующие комплексного подхода к их сохранению. Историческая часть города Пензы соответствует всем критериям, рекомендованным Министерством культуры Российской Федерации органам власти субъектов Российской Федерации при формировании предложений о включении населенного пункта или его части в перечень исторических поселений. Пенза является городом, со времени возникновения которого прошло 360 лет. За этот период он играл важную роль в отечественной истории: город-крепость на оборонительной линии Российского государства в 17 в., центр формирования Пензенского ополчения 1812 года, «Город трудовой доблести» и крупный центр эвакуационной промышленности предприятий военно-промышленного комплекса во время Великой Отечественной войны. Город является свидетельством исторической градостроительной деятельности и культурных традиций. Здесь имеется четко локализованное целостное историческое градостроительное образование, высокая сохранность ценной исторической планировочной структуры в увязке с природным ландшафтом и естественным рельефом, значительное число ценных исторических зданий, формирующих пространственную композицию и архитектурный облик города. Это подтверждает возможность установления статуса ИП для исторической части города Пензы.

Остается невыясненным один вопрос: какой значимостью обладает историко-культурное наследие Пензы – федеральной или региональной. Согласно методике оценки историко-культурной ценности поселения, разработанной в НИИТИАГ РААСН под руководством Э.А. Шевченко [8], поселения, претендующие на статус исторических, должны набрать определенное количество баллов в результате суммарной балльной оценки показателей ценности. Минимальная сумма баллов, которую необходимо набрать для возможности обоснования статуса ИП федерального значения – 3,0 балла, регионального значения – 1,5 балла. Показатели ценности исторической среды г. Пензы на сегодняшний день суммарно можно оценить на 1,87 балла, что позволяет предположить возможность установления для исторического центра г. Пензы статуса ИП регионального значения.

Выводы

1. Установлено наличие элементов архитектурно-градостроительного наследия города Пензы, обладающих значительной ценностью и подтверждающих возможность установления статуса исторического поселения регионального значения.
2. Наиболее сохранившейся из предметов охраны является планировочная структура исторической части города Пензы как характерный пример планировки городов периода классицизма. Степень ее сохранности можно оценить как «удовлетворительную»: сохранились элементы дорегулярной и регулярной планировки города, исторические красные линии застройки не претерпели значительных изменений, отсутствуют новые улицы, нарушающие общие композиционные принципы планировки.
3. Установлена степень сохранности исторически ценных градоформирующих объектов, объемно-пространственной структуры города (составляет 40–60 %). Историческая застройка сохранила свои морфологические характеристики (сохранились исторически сложившиеся типы застройки, характерные для Пензы XVIII – первой половины XX вв.).
4. Наибольшим изменениям во времени подверглись силуэт застройки, композиционно-видовые связи и панорамы; сохранившиеся и восстановленные исторические доминанты играют ведущую роль в формировании силуэта и панорам города.
5. Наличие в городе сохранившейся целостной исторической среды позволяет говорить об острой необходимости изменения общей стратегии города в отношении

исторического наследия с охраны отдельных объектов к комплексному подходу, позволяющему сохранять в том числе градостроительное наследие и ландшафтно-визуальные особенности восприятия города, от отношения к историческим объектам как «обременению» к их восприятию как «потенциала развития».

6. Результаты исследования рекомендуются для последующего обоснования статуса г. Пензы как ИП регионального значения и внесения предложений по сохранению исторической среды города.

Список литературы

1. Шевченко, Э.А. Правовые аспекты охраны объектов культурного наследия (от единичных памятников к градостроительным комплексам) / Э.А. Шевченко, А.А. Никифоров. – СПб.: Зодчий, 2014. – 36 с.
2. Шевченко, Э.А. Нематериальное культурное наследие как предмет охраны исторического поселения: размышления о предмете охраны / Э.А. Шевченко // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 83–90. – DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-83-90.
3. Шевченко, Э.А. Историческое поселение как целостный объект историко-культурного наследия, свидетельство устойчивого развития населенного пункта / Э.А. Шевченко // Устойчивое развитие территорий: сборник докладов III Международной научно-практической конференции, Москва, 26–27 мая 2021 года. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2021. – С. 131–133.
4. Крогиус, В.Р. Исторические города России как феномен ее культурного наследия. монография / В.Р. Крогиус. – М.: Прогресс-Традиция, 2009. – 312 с.
5. Емельянов А.А. Историко-культурная оценка территорий исторических поселений и ее использование в градостроительном регулировании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 18.00.04 / А.А. Емельянов. – М., 2004. – 28 с.
6. Ахмедова, Е.А. Архитектурно-градостроительная среда исторического поселения Самара: базис исследования и концепция устойчивого развития / Е.А. Ахмедова, Т.В. Вавилонская // Архитектура и строительство России. – 2023. – № 3(247). – С. 12–23.
7. Вавилонская, Т.В. Разработка проекта предмета охраны и историко-культурного опорного плана в целях включения Самары в перечень исторических поселений / Т.В. Вавилонская, Е.А. Ахмедова, Ю.Л. Райхель // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство: сборник статей. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 536–546.
8. Методические рекомендации оценки историко-культурной ценности поселения. Применение критериев историко-культурной ценности поселения в оценке недвижимости, расположенной в границах исторического поселения / под ред. Э.А. Шевченко. – СПб.: Зодчий, 2014. – 264 с.
9. Дворжанский, А.И. Топонимика Пензы. История пензенских улиц. Улица Троицкая / А.И. Дворжанский, И.С. Шишкин. – М.: Локус Станди, 2012. – 460 с.
10. Дворжанский, А.И. Топонимика Пензы. История пензенских улиц. Улица Московская / А.И. Дворжанский, И.С. Шишкин. – М.: Локус Станди, 2012. – 496 с.
11. Щукин, С.И. Губернский город Пенза на рубеже XIX–XX веков / С.И. Щукин, А.И. Дворжанский. – Пенза: ИПК «Пензенская правда», 2001. – 227 с.
12. Летучева, О.А. Региональные особенности архитектуры Пензенской губернии эпохи классицизма: дис. ... канд. архитектуры: специальность 18.00.01 / О.А. Летучева. М., 2000. – 170 с.
13. Соколова, Н.В. Высотный регламент для исторического центра города Пензы / Н.В. Соколова, В.В. Ухабин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 64–72. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-64-72.

14. Соколова, Н.В. Проблемы установления статуса исторического поселения / Н.В. Соколова, В.Д. Косарева // Архитектурные исследования. – 2023. – № 2(34). – С. 62–71.
15. Соколова, Н.В. Особенности формирования промышленных территорий г. Пензы в XVIII – начале XX веков / Н.В. Соколова, Д.А. Малыхина // Вопросы планировки и застройки городов: материалы XXXIV международной научно-практической конференции, Пенза, 02–03 июня 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2022. – С. 138–146.
16. Sokolova, N.V. Searching for preservation methods of the peculiarity of Russian cities (taking Penza for an example) / N.V. Sokolova // European Science and Technology: materials of the X international research and practice conference, Munich, May 28th – 29th, 2015. Vol. I. – Publishing office Vela VerlagWaldkraiburg – Munich – Germany, 2015. – P.42–47.
17. Ещин, Д.В. Историко-градостроительные особенности формирования деревянной жилой застройки Пензы: монография / Д.В. Ещин. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2023. – 106 с.
18. Лапшина, Е.Г. Архитектурно-градостроительное развития исторического города Пензы в XVIII-XIX вв.: монография / Е.Г. Лапшина, Л.А. Ермошкина. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 82 с.
19. Лапшина, Е.Г. Архитектура города Пензы и вклад столичных архитекторов в формирование ее образа на рубеже XIX-XX вв. / Е.Г. Лапшина, Л.В. Савельева // Архитектура и современные информационные технологии. – 2022. – № 4(61). – С. 97–113. – DOI 10.24412/1998-4839-2022-4-97-113.
20. Кутай, Е.П. Развитие системы высотных ориентиров центра исторического города (на примере г. Пензы) / Е.П. Кутай // Приволжский научный журнал. – 2016. – № 1(37). – С. 176–181.

References

1. Shevchenko, E.A. Legal aspects of the protection of cultural heritage sites (from single monuments to urban complexes) / E.A. Shevchenko, A.A. Nikiforov. – St. Petersburg: Zodchiy, 2014. – 36 p.
2. Shevchenko, E.A. Intangible Cultural Heritage as a Subject of Protection of the Historical Settlement: Reflections on the Subject of Protection / E.A. Shevchenko // Academia. Architecture and Construction. – 2021. – No. 2. – P. 83–90. – DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-83-90.
3. Shevchenko, E.A. A Historical settlement as an integral object of historical and cultural heritage, evidence of the sustainable development of a settlement / E.A. Shevchenko // Sustainable development of territories: Collection of reports of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 26–27, 2021. – M.: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2021. – P. 131–133.
4. Krogus, V.R. Historical cities of Russia as a phenomenon of its cultural heritage / V.R. Krogus. – M.: Progress-Tradition, 2009. – 312 p.
5. Emelyanov, A.A. Historical and cultural assessment of the territories of historical settlements and its use in urban planning regulation: abstract of the dis. ... of candidate of sciences: specialty 18.00.04 / A.A. Emelyanov. – M., 2004. – 28 p.
6. Akhmedova, E.A. Architectural and urban planning of Samara historical settlement: the basis of research and concept of sustainable development / E.A. Akhmedova, T.V. Vavilonskaya // Architecture and construction of Russia. – 2023. – No. 3(247). – P. 12–23.
7. Vavilonskaya, T.V. Project of the protection subject and historical and cultural support plan for the purpose of including Samara in the list of historical settlements / T.V. Vavilonskaya, E.A. Akhmedova // Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and urban development: a collection of articles. – Samara: Samara State Technical University, 2019. – P. 536–546.

8. Methodological recommendations for assessing the historical and cultural value of the settlement. Application of criteria for the historical and cultural value of a settlement in the assessment of real estate located within the boundaries of a historical settlement. – St. Petersburg: Zodchiy, 2014. – 264 p.
9. Dvorzhansky, A.I. Toponymy of Penza. History of Penza streets. Troitskaya street / A.I. Dvorzhansky, I.S. Shishkin. – M.: Locus Standi, 2012. – 460 p.
10. Dvorzhansky, A.I. Toponymy of Penza. History of Penza streets. Moskovskaya street / A.I. Dvorzhansky, I.S. Shishkin. – M.: Locus Standi, 2012. – 496 p.
11. Shchukin, S.I. Provincial city of Penza at the turn of the 19th–20th centuries / S.I. Shchukin, A.I. Dvorzhansky. – Penza: IPK Penzenskaya Pravda, 2001. – 227 p.
12. Letucheva, O.A. Regional features of the architecture of the Penza province of the era of classicism: dis. ... of candidate of architecture: specialty 18.00.01 / O.A. Letucheva. – M., 2000. – 170 p.
13. Sokolova, N.V. Height regulations for the historical center of Penza / N.V. Sokolova, V.V. Uhabin // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. – 2023. – No. 11. – P. 64–72. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-64-72.
14. Sokolova, N.V. Problems of establishing the status of a historical settlement / N.V. Sokolova, V.D. Kosareva // Architectural research. – 2023. – No. 2(34). – P. 62–71.
15. Sokolova, N.V. Features of the formation of industrial territories of Penza in the 18th – early 20th centuries / N.V. Sokolova, D.A. Malykhina // Issues of urban planning and development: Proceedings of the XXXIV international scientific and practical conference, Penza, June 02–03, 2022. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2022. – P. 138–146.
16. Sokolova, N.V. Searching for preservation methods of the peculiarity of Russian cities (taking Penza for an example) / N.V. Sokolova // European Science and Technology: materials of the X international research and practice conference, Munich, May 28th – 29th, 2015. Vol. I. – Publishing office Vela VerlagWaldkraiburg – Munich – Germany, 2015. – P.42–47.
17. Eschin, D.V. Historical and urban planning features of the formation of wooden residential buildings in Penza: monograph / D.V. Eschin. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2023. – 106 p.
18. Lapshina, E.G. Architectural and urban development of the historical city of Penza in the 18th-19th centuries: monograph / E.G. Lapshina, L.A. Ermoshkina. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2014. – 82 p.
19. Lapshina, E.G. Architecture of the city of Penza and the contribution of capital architects to the formation of its image at the turn of the 19th-20th centuries / E.G. Lapshina, L.V. Savelyeva // Architecture and modern information technologies. – 2022. – No. 4(61). – P. 97–113.
20. Kutai, E.P. Development of a system of high-altitude landmarks in the center of a historical city (using the example of Penza) / E.P. Kutai // Privolzhsky Scientific Journal. – 2016. – No. 1(37). – P. 176–181.

УДК 721.05:364.69 + 72.011

DOI 10.54734/20722958_2024_4_209

Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 603950, г. Н. Новгород,
ул. Ильинская, д. 65,
тел.: (831) 430-54-92;

Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева
Россия, 430000, г. Саранск,
ул. Советская, д. 24,
тел.: 8(951) 055-86-80

Гладышева Маргарита Викторовна,
аспирант ННГАСУ,
ст. преподаватель кафедры архитектуры
и дизайна «МГУ им. Н.П. Огарёва»
E-mail: nikel_its_me@mail.ru

Nizhny Novgorod State University of
Architecture and Civil Engineering University
Russia, 603950, N. Novgorod, 65,
Ilyinskaya St.,
tel: (831) 430-54-92

Mordovian State University
named after N.P. Ogarev
Russia, 430000, Saransk, 24, Sovetskaya St.,
tel: 8(951) 055-86-80

Gladysheva Margarita Viktorovna,
Postgraduate student of the Department of
Architectural Environment Design, senior
lecturer of the Department of Architecture
and Design
E-mail: nikel_its_me@mail.ru

ПРОЯВЛЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЕ

М.В. Гладышева

Актуальность данного исследования обусловлена интенсивным распространением и возрастающим значением имитационного пространства как интегральной составляющей творческого синтеза, способствующей внедрению региональной культуры в международный контекст. Статья посвящена исследованию феномена имитационного пространства архитектурной среды как особого типа синтетического архитектурного пространства, выявлению его качеств и принципов в современной мировой архитектурной практике.

Ключевые слова: имитационное пространство, постмодернизм, театрализация, фестивальные пространства, метод копирования, синтетическая среда

MANIFESTATION OF IMITATION SPACE IN ARCHITECTURAL ENVIRONMENT

M.V. Gladysheva

The relevance of this study is due to the intensive spread and increasing importance of imitation space as an integral component of creative synthesis, contributing to the introduction of regional culture into international context. The article is devoted to the study of the phenomenon of imitation space of architectural environment as a special type of synthetic architectural space, identifying its quality and principles in modern world architectural practice.

Keywords: simulation space, theatricalisation, postmodernism, festival spaces, copying method, synthetic environment

В последние годы наблюдается увеличенный интерес к формированию дизайна новаторских пространств, которые погружают горожан и туристов в уникальную атмосферу праздника. Преобразование городской среды каждого конкретного населенного пункта рождает новую площадку для проведения общественного досуга, зрелищ, масштабных праздников, искусственных представлений. Гигантские павильоны и композиции временно переносят участников события в другую эпоху, воссоздавая различные формы и временные структуры, которые эмулируют разнообразные архитектурные стили и образы [1].

Имитационное пространство – это компиляция визуальных или художественных элементов, целью которой является эмуляция или репродукция характеристик и осо-

бенностей реального окружающего пространства либо передача специфической тематической атмосферы, настроения или исторического контекста с целью создания иллюзии нахождения в определенном месте или времени.

Имитационное пространство возникает после окончания различных фестивалей и аналогичных массовых мероприятий. Чаще оно является временным, но оставляет глубокое впечатление и оказывает влияние на городскую среду. После завершения фестиваля кварталы, улицы и площади преобразуются в аутентичное синтетическое пространство, где имитационное пространство создает атмосферу конфабуляции, окружая людей неординарными архитектурными и декоративными элементами.

Имитационные пространства могут делиться на два вида:

- беспорядочные (иррациональное формирование синтетических пространств без правил и особенностей, диссонирующих, без привязки к более крупному пространству);
- организованные (новоспроектированные синтетические пространства, с рациональным использованием формы и функции, встроенные в структуру более крупного пространства).

Качества, присущие имитационным пространствам:

- 1) многоаспектность (сопоставление внешнего – городского – и внутреннего – театрального – пространства-времени);
- 2) поэтика (внутренние закономерности организации притягательного пространства);
- 3) театрализация (вторичное по уровню воздействия на архитектуру явление при создании и организации новых пространств);
- 4) гиперреальность (замена реального знаками реальности – симулякрами).

Ярким примером имитации является архитектурный фестиваль Burning Man в пустыне Невада, где временный город Black Rock City формируется исключительно на время проведения мероприятия (рис. 1).

Особенности Burning Man включают в себя радиальную структуру временного города, напоминающую палаточный лагерь в постапокалиптическом стиле. Центральным элементом фестиваля является деревянный человек, который в финале события подвергается сожжению, символизируя перерождение и очищение в контексте архаических ритуалов. Burning Man становится площадкой экспериментов, где участники делятся уникальными архитектурно-художественными идеями, выходя за рамки традиционной архитектурной парадигмы.



Рис. 1. Главная улица фестиваля Burning Man, ведущая к храму «Целости», и временный город Black Rock City

Фестиваль обретает идеологический смысл, подчеркивающий временность и мгновенность существования, уподобляя себя фениксу – символу перерождения. Burning Man становится местом, где культура, искусство и архитектура сочетаются для удивительного переживания временного пространства, перенося нас в мир уникальных возможностей и вдохновения. Среди организаторов фестиваля нет режиссеров и сценаристов – каждый участник вносит свою тематическую и визуальную лепту в зависимости от направления. Исходя из этого, создаются коллективные объек-

ты современного искусства, где каждая работа остаётся органичной и уникальной, так как создана в определенное время и в нужном контексте. Эмоциональное воздействие на участников достигается благодаря арт-объектам и инсталляциям, которые формируют эффектную обстановку. Взаимодействие фестивального пространства Burning Man с окружающей средой основано на принципе экологической устойчивости (eco-friendly). Участники пытаются минимизировать неблагоприятное воздействие временного города Black Rock City на экосистему пустыни. По прошествии фестиваля часть конструкций сжигается, перерабатывается или разбирается до следующего мероприятия. Таким образом, данный подход позволяет иначе взглянуть на концепцию «самоликвидирующихся» фестивальных пространств, возводя их в ранг перформативного акта искусства трансцендентального.

Следующим объектом нашего исследования стал павильон фестивального центра ратуши Нерамит для фестиваля музыки Wonderfruit (рис. 2). Павильон представляет собой единое архитектурное сооружение, состоящее из квадратных труб, объединенных с гофрированными цинковыми листами, служащими кровельным покрытием. Внутреннее пространство павильона организовано вокруг главной сцены, являющейся центральным элементом и доминантой архитектурного комплекса.

Основной концепцией павильона является минималистичный подход к использованию ресурсов, включая мебель и материалы, с упором на архитектурную конструкцию. Эта концепция сочетает в себе функциональные и художественные аспекты, делая данное сооружение уникальным. В частности, использование двускатной крыши как основного элемента павильона представляет собой нестандартное решение. Крыша выполняет не только защитную функцию, но и выступает в качестве стен, обеспечивая конструктивную простоту и эстетическое единство помещения.



Рис. 2. Фестивальное пространство «Wonderfruit»

Кроме того, крыша обладает регулируемыми элементами из цинковых листов и может перемещаться с помощью колес, установленных на концах скатов. Это позволяет регулировать яркость освещения и количество солнечного света внутри павильона, оптимизируя условия для проведения различных мероприятий. Таким образом, конструкция кровельных цинковых листов обеспечивает гибкость и функциональность сооружения, позволяя адаптировать пространство под различные потребности и условия эксплуатации.

Строительная конструкция двускатной крыши обладает собственными преимуществами в защите от внешних воздействий, таких, как осадки. Интересным является и само решение использование лишь крыши, своего рода тривиального укрытия. То есть внутреннее пространство имеет оболочку в виде крыши, но также является одновременно и пространством улицы. Крыша – граница между этими двумя измере-

ниями и очерчивает то, что относится к павильону. Суммируя вышесказанное, отметим, что вся конструкция на первый взгляд обыкновенной двускатной крыши способна превратиться во что-то более оригинальное. Эти образы и личные нарративы стали строениями, внутри которых можно было возвести свои конструкции. То есть форма строения рождала новое строение с новыми конструкциями, но уже в воображении участников.

Анализируя пространство театра «Город времени» ARANYA в Китае, можно рассмотреть влияние «зеленой» архитектуры на окружающую фестивальную среду (рис. 3). Основной задачей проекта было создание временного пространства, объединяющего 130 групповых и 194 индивидуальных объекта. Проект существовал лишь 300 часов и затем был демонтирован [2]. Центральным архитектурным элементом фестиваля стали металлические переработанные панели высотой 2 метра, эмулирующие стены «Города времени» и формирующие «помещения» в его внутреннем пространстве. Эти стены создавали городскую среду с радиально-кольцевым планированием.



Рис. 3. «Город времени» ARANYA в Китае

Главной точкой притяжения в данном городе является центральная площадь, на которой проводились основные культурные и общественные мероприятия. Прямо от этой площади отходит коридор, перпендикулярно направленный к Ляодунскому заливу, который служит входной аркой в «город». Таким образом, структура фестивальную территории органично вписывается в ландшафт, исходя из перпендикулярного положения к заливу, что создает гармонию с природными элементами. Концепция планировки и организации «города» отличается от обычной архитектурной практики и исключает традиционные элементы, такие, как крыши, полы, окна и двери [3]. Проект «Город времени» задумывался как объединение человека-художника с природной средой, где сам «город», лишенный архитектурного украшения, представляет собой архитектурное творение, способное через свою форму и контекст передать задуманное автором искусства значение. Таким образом, фестиваль превращается в целостное торжество, вовлекая в него природные элементы, людей и сам «город». «Город» становится еще одним участником фестиваля, который временно обретает жизнь и затем, по завершении мероприятия, покидает свое место. Форма «города» напоминает о связи проекта с элементами природы, особенно с водой, представленной здесь в символическом образе рыбы, символизирующей зарождение всего живого из воды. Архитектурное расположение города, напоминающего формой рыбу при взгляде сверху, помогает эффективно распределить активности на территории фестиваля [4].

В месте «хвоста» находится малая архитектурная форма в виде зонта. Основные функциональные зоны, такие, как помещения для выставки скульптур, лектория и отдыха, являются основными элементами «туловища». Главная площадь с часами, отсчитывающими конец фестиваля, представляет собой сердце города-рыбы. В «голове» конструкции находятся ключевые элементы, включая помещения главных сцен, скульптуры и зоны отдыха. В центричной и компактной структуре города фестиваль размещен в обособленном месте, однако прямо перпендикулярно к нему идет одна из главных трасс города – S365 [5]. Использование «зеленой» архитектуры, включая на-

туральные материалы, такие, как древесина, бамбук, камень, а также переработанные металлические панели, способствует созданию устойчивой и экологически чистой среды. Так архитекторы создают сооружения, которые минимизируют нагрузку на окружающую среду и гармонично вписываются в природное окружение фестиваля.

В ходе анализа синтетической архитектурной среды в период постмодернизма был выявлен особый тип имитационных пространств, существенно отличающихся от трансгрессивного восприятия городской среды. Важно отметить, что архитектурная парадигма постмодернизма характеризовалась не имитацией с целью дестабилизации природных законов логики собственного конструктивного строения, а использованием имитации для расширения горизонтов творческой деятельности в области дизайна и инженерии. Театрализация являлась одним из методов творческого подхода при формировании вторичной архитектурной среды с нарушением конструктивного «языка» [3].

Примером такой практики может служить «Площадь Италии» в Новом Орлеане, спроектированная архитектором Чарльзом Муром в 1978 году (рис. 4). Ее первоначальной целью было создание памятника итальянским гражданам города. В 2002 году площадь и ее окрестности опустели, в 2005 году во время урагана часть ее была разрушена, но позже отель Loews инвестировал средства на ее восстановление. Изначальная функция места заключалась в создании мемориала, посвященного итальянским иммигрантам; что касается настоящего времени, то сегодня площадь имеет больше эстетическую и общественную функцию. Площадь является единым плато, местом для массовых зрелищных мероприятий, для культурного отдыха туристов и горожан.



Рис. 4. «Площадь Италии», архитектор Чарльз Мур

«Площадь Италии» Ч. Мура относится к стилю «постмодернизм», а именно к частичному историзму. Архитектурная эклектика здесь целенаправленно создана для вызывания ностальгических эмоций у зрителя, подобно ощущениям, которые возникают при виде исторических сооружений. Эти решения направлены на создание нужного впечатления с помощью повторяющихся элементов. Популярный в Северной Америке, этот подход быстро распространился и на другие континенты. Метафоричность и стилизованная постирония проявляются в ансамбле «Площади Италии», где зритель воспринимает объект на эмоциональном уровне. Характерные цитаты и выраженное воплощение итальянского Ренессанса в этом ироничном постмодернистском произведении архитектора Чарльза Мура в Новом Орлеане ярко демонстрируют античную классику в современном американском контексте [6]. Архитектор использует игру цвета, света и формы, символическое облачение колонны в железные листы, огни неона, подсвечивающие архитектурные профили, эксперименты с яркими пятнами, материалами и сочетание несочетаемого. Все это создает парадокс «цитирования» и ассоциативные связи, которые удерживают образ в памяти. В композицию площади круглой формы были внедрены все характерные элементы, которые

ассоциируются с Италией. Чарльз Мур имитировал античные формы и архитектурные детали, добавив к ним выразительное неоновое освещение. Выделенное цветовое оформление и применение неоновой подсветки создают впечатление уникального и узнаваемого объекта, приводящего к ассоциациям с полуостровом, на котором расположена Италия [7]. Это, в свою очередь, погружает иммигрантов в ностальгические воспоминания о родине и вызывает у них новое восприятие объекта, имея сильное воздействие благодаря легкой идентификации этой имитации. Автоматизированное движение неоновых огней придает пространству ощущение динамики, направленное на охват более широкой территории, привлекает внимание зрителей и вызывает возбуждение через реакцию на яркий свет [8].

Следующий пример – Лас-Вегас Стрип – представляет собой сложное полифункциональное пространство, которое привлекает туристов за счет аккумуляции копий культурных объектов, распространенных по всему миру (рис. 5).



Рис. 5. Дневная панорама центральной части Лас-Вегаса

Этот город, широко раскинувшийся по ландшафту, характеризуется своей открытостью и непредсказуемостью пространства. Такие места воспринимаются в плоскости: по сложным символам в пространстве, графическим или репрезентативным знакам, паттернам на земле или двумерным объектам, а не по объемам и зданиям [7].

В архитектурном ландшафте наблюдается сложное сочетание разноуровневых зданий различных стилей и цветовых решений, которые формируют облик динамичной «артерии» города, создавая впечатляющий визуальный эффект. Присутствие разветвленной транспортной инфраструктуры с автомагистралями, сложными многоуровневыми переходами и пешеходными путями делает данную улицу привлекательной и легкодоступной для туристов. Навигацию по данному пространству обеспечивает система знаков-символов, таких, как освещение в ночное время или уличные обозначения днем, руководящих движением по городу. Ключевую роль в определении пространства играют архитектурные детали, элементы благоустройства и ориентация зданий. Следует отметить, что взаимодействие улицы Лас-Вегас Стрип с окружающей средой представляет собой гипертрофированную имитацию сосредоточения всех туристических объектов мира, подчиненную коммерческим интересам и стремлению интегрировать пространство с окружающей средой. Это выражается в использовании инновационных технологий для экологических практик, создании образа устойчивого и современного пространства, а также в воздействии на ассоциативном уровне через «эффект якорения».

Выводы: Таким образом, благодаря усиленному взаимодействию, вовлеченности в процесс, свободе самовыражения и реализации любых творческих замыслов формируется особое пространство имитации, с характерными признаками и отличительными чертами, которое не вписывается в существующие нормы типологических пространственных структур, формируя при этом свое экспериментальное поле социальной и

художественной интеграции. Проведенный комплексный анализ ряда имитационных пространств в различных архитектурных средах позволяет сделать следующие выводы:

1) В качестве оптимального подхода к формированию имитационных пространств предлагается синтетическая методология осмысления архитектурной среды, что служит формированию пространств методами симбиоза, копирования, имитации.

2) Имитационное пространство проявляется через характеристики динамичности, трансформируемости и мобильности синтетического пространства, а также в интегрирующей функции современных технологий, может нести символическую функцию, семантическую коммуникацию, образную метафору и авторский стиль создателя.

3) Имитационное пространство (часто используемое при организации досугово-развлекательных массовых мероприятий (например, фестивалей) – это еще малоизученное явление, функционирующее по законам художественно-коммуникационной зрелищности, которое имеет определенные характерные признаки: синтетичность, локальность и контекстуальность.

4) Имитационное пространство строится на следующих закономерностях: 1) заимствование и имитация как элементы развития архитектуры; 2) копирование, рецепция и заимствования могут иметь различную направленность, т.к. варьируются обстоятельства при акте появления имитации; 3) компиляции трансформированных образов первичной действительности (копий) как одна из наиболее приближенных форм имитации исходя из целей его применения.

Список литературы

1. Резникова, Е.И. Фестиваль искусств как синтетическое художественное пространство: дис. ... канд. искусствоведения: 17.00.09 / Е.И. Резникова. – СПб., 2006. – 186 с.
2. Маевская, М.Е. Язык архитектурной утопии XXI века / М.Е. Маевская // Современная архитектура мира. – 2016. – № 7. – С. 41–61.
3. Джеймисон, Ф. Постмодернизм, или Культурная логика позднего капитализма / Ф. Джеймисон. – 2-е изд., испр. – М.: Изд-во ун-та Гайдара, 2019. – 799 с. – ISBN 978-5-3255-557-6;
4. Бурлина, Е. Город как сцена. История. Повседневность. Будущее / Е. Бурлина. – Самара: Медиа книга, 2015. – 304 с.
5. Серебренникова, Т.А. Принципы формообразования в архитектуре в эпоху информационного взрыва / Т.А. Серебренникова // Региональные архитектурно-художественные школы. – 2011. – № 1. – С. 208–212.
6. Дженкс, К. Архитектурный знак / К. Дженкс // В кн. «Знак, символ и архитектура». – New York: John Wiley & Sons Ltd, 1980 – 574 с.
7. Вентури, Р. Уроки Лас-Вегаса: забытый символизм архитектурной формы / Роберт Вентури, Дениз Скотт Браун, Стивен Айзенур; пер. с англ. Ивана Третьякова. – М.: Strelka Press, 2015. – 211 с.
8. Дженкс, Ч. Язык архитектуры постмодернизма / Ч. Дженкс; под ред. А.В. Рябушина, В. Л. Хайта. – М.: Стройиздат, 1985. – 36–51 с.

References

1. Reznikova, E.I. Art festival as a synthetic art space : dis. ... Candidate of Art History: 17.00.09 / E.I. Reznikova. – St. Petersburg, 2006. – 186 p.
2. Maevskaya, M.E. The language of architectural utopia of the XXI century / M.E. Maevskaya // Modern architecture of the world. – 2016. – № 7. – P. 41–61.
3. Jamieson, F. Postmodernism, or the Cultural Logic of Late Capitalism / F. Jamieson. – 2nd ed. – M.: Izd-vo un-ta Gaidar, 2019. – 799 p. – ISBN 978-5-3255-557-6;
4. Burlina, E. City as a stage. History. Everyday life. Future / E. Burlina. – Samara: Media Book, 2015. – 304 p.

-
5. Serebrennikova, T.A. Formation principles in architecture in the era of information explosion / T.A. Serebrennikova // Regional architectural and art schools. – 2011. – № 1. – P. 208–212.
 6. Jenks, K. The architectural sign. In Sign, symbol, and architecture / K. Jencks. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 1980. – 574 p.
 7. Venturi, R. Lessons of Las Vegas: forgotten symbolism of architectural form / Robert Venturi, Denise Scott Brown, Steven Eisenour; translated by Ivan Tretyakov. – M.: Strelka Press, 2015. – 211 p.
 8. Jenks, Ch. The language of architecture of postmodernism / Ch. Jenks; ed. by A.V. Ryabushin, V.L. Hait. – M.: Stroyizdat, 1985. – P. 36–51.

Указатель статей, опубликованных в 2024 году

Index of articles, published in 2024

1. **Абдрахимов В.З.** Рециклинг отходов металлургии в производстве кислотоупоров без применения традиционного природного сырья. – №4(61). – С.54–62.
2. **Айзатуллин М.М., Зарипов М.М., Сабитов Л.С., Гарькина И.А.** Конструктивно-технологические особенности строительства порталных решетчатых опор. – №3(60). – С.48–56.
3. **Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Бурьянов А.Ф.** Использование фосфогипса как сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатных цементов. – №2(59). – С.30–46.
4. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Новая технология флотационной очистки сточных вод, предусматривающая введение флотореагентов в виде мелкодисперсных аэрозолей. – №1(58). – С.138–145.
5. **Андреев С.Ю., Белова Л.В., Лебединский К.В.** Теоретический анализ термодинамических характеристик пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в различных режимах. – №2(59). – С.164–174.
6. **Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Князев В.А., Глебова Т.А.** Вихревой сатуратор. – №3(60). – С.134–141.
7. **Аюбов Н.А., Шорстова Е.С., Ключев А.В., Ключев С.В.** Изучение процессов реакционного взаимодействия фибры с цементной матрицей. – №1(58). – С.18–23.
8. **Баканова С.В., Фролов М.В.** Оценка эффективности воздушного охлаждения. – №2(59). – С.184–188.
9. **Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Сабитов Л.С., Викторова О.Л.** Архитектура научно-образовательных комплексов в условиях реконструкции. – №3(60). – С.175–183.
10. **Бенаи Х.А., Радионов Т.В., Харьковская Н.Н., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Архитектурная динамика при реконструкции объектов городской застройки. – №1(58). – С.166–173.
11. **Береговой А.М.** Обогрев подземных и заглубленных помещений теплом верхнего слоя земли. – №3(60). – С.184–188.
12. **Береговой А.М.** Энергосбережение в малоэтажной жилой застройке из разнотипных зданий, подключенных к системе автоматического регулирования тепла. – №2(59). – С.209–214.
13. **Береговой В.А., Лавров И.Ю.** Эпоксидные составы для защиты бетона и ремонта железобетонных конструкций. – №2(59). – С.100–109.
14. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Идентификация и современные парадигмы в материаловедении. – №4(61). – С.24–28.
15. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Системный подход и законы развития: синтез композитов. – №3(60). – С.19–25.

-
16. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Технологии системного анализа с вариацией структуры и значений параметров модели при синтезе материала как сложной системы. – №2(59). – С.73–80.
17. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Формирование свойств композитов: от эмпирического подхода к фундаментализации. – №1(58). – С.33–39.
18. Ванюшкин А.С. Система топологических характеристик как основа формирования креативных пространственных единиц. – №2(59). – С.195–208.
19. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Расход воздуха транспортной магистралью вакуумной системы мусороудаления. – №4(61). – С.190–197.
20. Викторov В.В., Викторова О.Л. Внецентренно нагруженные фундаменты с частичным отрывом подошвы: определение максимального давления на грунт. – №1(58). – С.105–114.
21. Выродова К.С., Ядыкина В.В. Использование шунгита для повышения качества полимерно-битумного вяжущего и асфальтобетона. – №2(59). – С.89–99.
22. Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т. Биостойкость модифицированных эпоксидных композитов. – №4(61). – С.17–23.
23. Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т. Прочностные и деформативные свойства эпоксидных защитных композитов. – №1(58). – С.59–64.
24. Гарькина И.А., Данилов А.М. Временные ряды в строительном материаловедении. – №1(58). – С.99–104.
25. Гарькина И.А., Данилов А.М. Опыт проектирования композитов: ретроспективный анализ. – №2(59). – С.22–29.
26. Гладышева М.В. Проявление имитационного пространства в архитектурной среде. – №4(61). – С.209–216.
27. Глухов В.С., Хрянина О.В., Янгуразов Ю.Р., Волков К.О. Несущая способность свай при погружении вдавливанием. – №3(60). – С.66–73.
28. Гречишкин А.В., Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Экспериментальная оценка комбинированного метода расчета импульсного шума, распространяющегося в помещении. – №3(60). – С.214–222.
29. Гринько Е.А. Типы пространственных криволинейных структур и оболочек строительного назначения. – №4(61). – С.128–141.
30. Гришин Б.М., Бикунова М.В., Салмин С.М., Янюшкин Д.А. Теоретические исследования процесса коагуляции примесей воды различной степени дисперсности. – №3(60). – С.128–133.
31. Гришина А.Н., Королев Е.В. Особенности раннего структурообразования композиционных цементных вяжущих, содержащих фунгицидный нано- и микро-размерный модификатор. – №4(61). – С.5–16.
32. Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Рахимов Ф.А. Ресурсосберегающие технологии при реконструкции жилых зданий: воздушная циркуляция в помещении. – №3(60). – С.189–194.
33. Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Шамина М.П. Объемно-планировочная структура учреждений дошкольного образования 1960–80-х годов. – №2(59). – С.215–224.
34. Дымолазов М.А., Сабитов Л.С., Гарькина И.А. Решетчатые пространственные покрытия пониженной металлоемкости. – №4(61). – С.116–127.
35. Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Орлова Н.А. Теоретические и экспериментальные исследования способов повышения эффективности технического устройства с вытяжным воздухопроводом внутри зонта. – №3(60). – С.148–162.
36. Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Петрова К.А. Конвективный теплообмен и закономерность развития вертикального, полуограниченного, настилающегося потока вдоль внутренней вертикальной поверхности наружного ограждения. – №1(58). – С.129–137.
37. Ермаков А.А., Захарова Е.А., Родин А.И. Стойкость пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород к воздействию плесневых грибов. – №4(61). – С.73–80.

38. **Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Макридин Н.И.** Порошково-активированные высокопрочные и сверхвысокопрочные фибробетоны и текстильбетоны нового поколения с улучшенными показателями прочности. – №2(59). – С.13–21.
39. **Жегера К.В., Лавров И.Ю., Трощев Д.В.** Оптимизация синтеза наноструктурирующей добавки для применения в рабочей смеси 3D-принтера. – №2(59). – С.60–65.
40. **Зайцева М.В., Логанина В.И., Куимова Е.И.** Оценка качества продукции с учетом состояния технологического процесса производства. – №3(60). – С.40–47.
41. **Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю.** Численные исследования преднапряженных сталебетонных балок с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. – №2(59). – С.126–133.
42. **Ивашенко Ю.А., Шабиев С.Г.** Инновационные направления повышения эффективности несущих конструкций многоэтажных зданий из железобетона. – №3(60). – С.90–99.
43. **Калатози Г.М., Урманова Х.В., Нецвет Д.Д., Шахова Л.Д., Строкова В.В.** Минералогический состав продуктов гидратации алюминатных цементов. – №1(58). – С.40–46.
44. **Карпов В.Н.** Исследование пространственной работы полносборного крупнопанельного деревянного дома. – №1(58). – С.115–120.
45. **Карпов В.Н.** Несущая способность и жесткость ребер панелей полносборных деревянных домов. – №4(61). – С.142–147.
46. **Колосов М.В., Липовка Ю.Л.** Анализ режимов работы горячего водоснабжения с использованием разработанной системы мониторинга. – №3(60). – С.163–174.
47. **Королев Е.В., Гришина А.Н., Ли Сяодун.** Оценка условий протекания щелочной коррозии. исследование объемного распределения воды в материале. – №3(60). – С.5–18.
48. **Кузина В.В., Гвоздева И.Г., Кошев А.Н.** Результаты численного моделирования физико-химических процессов металлизации, увлажнения и сушки объемно-пористых материалов. – №4(61). – С.48–53.
49. **Кузина В.В., Кошев А.Н.** Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах. – №3(60). – С.142–147.
50. **Кузина В.В., Кошев А.Н., Пономарева И.К., Еремкин А.И.** Определение параметров конвективного потока от отопительного прибора методом математического моделирования. – №2(59). – С.157–163.
51. **Кузина В.В., Кошев А.Н., Пономарева И.К., Кошев А.Н.** Расчет конвективной диффузии технического углерода при горении свечей в храме в условиях вертикальной вытяжки воздуха. – №1(58). – С.121–128.
52. **Ласьков Н.Н., Болдырева О.В., Лаврова О.В.** Прочность и эксплуатационная пригодность поврежденных железобетонных балок. – №2(59). – С.149–156.
53. **Ласьков Н.Н., Р. Раззак А.В., Зернов В.В., Мирсаяпов И. Т.** Механизмы образования и развития трещин в железобетонных плотинах. – №3(60). – С.100–107.
54. **Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф.** Использование фосфогипса как сырья для производства однокомпонентных вяжущих. – №1(58). – С.82–98.
55. **Лобов И.М., Ступина А.Э., Гарькин И.Н., Ахтямова Л.Ш.** Архитектурное формирование строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт (на примере Донбасса). – №3(60). – С.207–213.
56. **Логанина В.И., Карпова О.В.** Кинетика старения лакокрасочных покрытий в зависимости от качества их внешнего вида. – №2(59). – С.47–52.
57. **Логанина В.И., Пылаев В.С.** Влияние добавок синтетических полисахаридов на структурообразование известковых композитов. – №4(61). – С.81–87.
58. **Логанина В.И., Рыжов А.Д.** Фотокаталитические свойства известковых покрытий с добавкой на основе синтетических алюмосиликатов. – №2(59). – С.66–72.
59. **Логанина В.И., Федюк Р.С.** Фрактальный анализ качества внешнего вида лакокрасочных покрытий. – №1(58). – С.12–17.

-
60. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Параметры трещиностойкости цементных композитов. – №3(60). – С.57–65.
61. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Сравнительная вариационно-статистическая оценка качества параметров прочности цементных композитов. – №1(58). – С.72–81.
62. **Мартышкин Д.О.** Несущая способность соединений деревянных конструкций с различными параметрами вклеенных стеклопластиковых шайб. – №3(60). – С.108–117.
63. **Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Миронов Д.В., Кадысева А.А., Суглобов Д.А.** Получение холода с использованием гидравлической энергии. – №1(58). – С.157–165.
64. **Обухова С.Ю., Королев Е.В., Будкина А.О.** Особенности структурообразования модифицированного вяжущего в присутствии резиновой крошки. Часть 1. Совместимость резиновой крошки с углеводородными пластификаторами. – №1(58). – С.24–32.
65. **Обухова С.Ю., Королев Е.В., Будкина А.О.** Особенности структурообразования модифицированного вяжущего в присутствии резиновой крошки. Часть 2: определение рецептурно-технологических факторов при двухстадийной технологии. – №2(59). – С.5–12.
66. **Овчинников И.Г., Разов И.О.** Бионический дизайн и аддитивные технологии в мостостроении. – №4(61). – С.104–115.
67. **Орехова Т.Н., Фролова М.А., Сивальнева М.Н., Строкова В.В., Тюрин А.М.** Свойства сапонитсодержащего материала – отхода горноперерабатывающей промышленности архангельской алмазодобывающей провинции. – №4(61). – С.29–39.
68. **Очкина Н.А., Лаврова О.В., Шмарова Т.С., Очкин И.А.** Радиационно-защитные высокоплотные композиты специального назначения. – №4(61). – С.88–96.
69. **Очкина Н.А., Шмарова Т.С., Очкин И.А.** Радиационный разогрев и термостойкость высокоплотных композитов особого назначения. – №3(60). – С.32–39.
70. **Плешивцев А.А., Король Е.А., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н.** Архитектурно-бионический подход к отображению функций и форм архитектурных объектов. – №2(59). – С.189–194.
71. **Продоус О.А., Шлычков Д.И., Шестаков А.А.** Сравнительный анализ разных методик гидравлического расчета изношенных металлических водопроводных сетей с внутренними отложениями. – №2(59). – С.175–183.
72. **Рожков В.С., Яхкинд М.И., Князев А.А.** Химическое и электрохимическое окисление соединений железа в синтезе феррата натрия на канализационных очистных сооружениях. – №4(61). – С.181–189.
73. **Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н.** Композиционное вяжущее для производства железобетонных изделий в заводских условиях. – №3(60). – С.26–31.
74. **Романенко И.И., Фадин А.И., Петровнина И.Н.** Ресурсоориентированная технология получения строительных материалов на основе сталеплавильного шлака. – №2(59). – С.53–59.
75. **Романова Т.Н., Белоглазова Т.Н.** Энергоинформационная модель управления теплоснабжением. – №1(58). – С.146–165.
76. **Светалкина М.А., Жегера К.В., Алпатов Е.Г.** Оптимизация состава сухих строительных смесей с применением программных средств. – №1(58). – С.65–71.
77. **Селютина Л.Ф., Бочарова Е.С.** Бревенчатый жилой дом в петрозаводске – объект культурного наследия: история и методология исследования. – №3(60). – С.195–206.
78. **Селютина Л.Ф., Ратькова Е.И., Корнеев А.А.** Длительная прочность древесины конструкций исторического здания в Повенце (республика Карелия). – №1(58). – С.174–181.
79. **Селяев В.П., Бабушкина Д.Р., Безрукова Е.С., Селяева С.П.** Поперечная сила, воспринимаемая бетоном при разрушении железобетонных изгибаемых элементов по наклонным сечениям. – №4(61). – С.97–103.
80. **Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Бабушкина Д.Р., Бусаргин Д.А.** Механика разрушения бетона с учетом фрактальных свойств структуры. – №2(59). – С.117–125.

-
81. **Снежкина О.В., Корнюхин А.В.** Прочность железобетонных балок при разрушении по наклонному сечению. – №4(61). – С.148–155.
82. **Снежкина О.В., Корнюхин А.В.** Развитие отечественных методов расчета прочности железобетонных элементов по наклонному сечению. – №2(59). – С.134–142.
83. **Соколова Н.В., Косарева В.Д.** Статус исторического поселения: оценка историко-культурного потенциала Пензы. – №4(61). – С.198–208.
84. **Соколова С.В., Холопов Ю.А., Сидоренко Ю.В.** Ремонт футеровок тепловых агрегатов жаростойкими композитами с помощью пропиточно-обмазочных технологий на основе отходов промышленных производств. – №1(58). – С.4–11.
85. **Тараканов О.В., Ивашенко Ю.Г., Ерофеева И.В.** Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ. – №1(58). – С.47–58.
86. **Тараканов О.В., Ильина Л.В., Гичко Н.О.** Влияние отрицательных температур на микроструктуру, кинетику твердения и прочность цементных материалов. – №4(61). – С.63–72.
87. **Тарасеева Н.И., Раткин В.В., Цирулев И.В.** Научно-теоретические и практические аспекты воздействия агрессивных сред на железобетонные конструкции транспортных сооружений. – №3(60). – С.118
88. **Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Малашкина С.А.** Риск-ориентированный подход в обеспечении качества асфальтобетонных смесей и дорожных покрытий на их основе. – №2(59). – С.81–88.
89. **Хомутов А.О., Усачев А.П., Рулев А.В.** Разработка принципа и математической модели определения экономически целесообразного количества цилиндрических каскет предварительной и тонкой очистки для жидких и газообразных топлив, размещенных внутри одного корпуса. – №4(61). – С.171–180.
90. **Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Киселев Е.В.** Получение неавтоклавного пенобетона из сухих смесей и оценка его прочности с позиций микромеханики композита. – №2(59). – С.110–116.
91. **Черкасов В.Д., Черкасов Д.В., Щербак А.Ю.** Эластичные самоклеящиеся радиопоглощающие покрытия. – №4(61). – С.40–47.
92. **Чмых Н.В., Третьякова О.В.** Снижение сил морозного пучения на поверхности подпорных стен: рациональные конструкции. – №4(61). – С.156–164.
93. **Шеин А.И.** Уравнения движения системы «сооружение – реактивный гаситель колебаний» при сейсмических возмущениях. – №4(61). – С.165–170.
94. **Шеин А.И., Зайцев М.Б.** Частотно-векторный анализ серии однотипных зданий разной этажности. – №3(60). – С.74–80.
95. **Шеин А.И., Чуманов А.В.** Система перекрестных связей производственных цехов на основе ленточно-тросовых гасителей с гидроцилиндрами одностороннего действия при сейсмических воздействиях. – №2(59). – С.143–148.
96. **Шеин А.И., Чуманов А.В., Зайцев М.Б.** Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений. – №3(60). – С.81–89.