

Учредитель и издатель

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

Главная редакция:

А.М. Данилов (главный редактор)  
Е.В. Королев (заместитель  
главного редактора)  
И.А. Гарькина (ответственный  
секретарь)

Адрес редакции:

440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,  
ПГУАС  
Тел/факс 8412 929501  
E-mail: regas@pguas.ru  
fmatem@pguas.ru  
www.rais.pguas.ru

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 10.12.2021.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд. л. 22. Тираж 500 экз. Первый завод 100.  
Заказ № 176.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО 4(49)/2021

## Содержание

ЖУРНАЛУ «РЕГИОНАЛЬНАЯ  
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО» –  
15 ЛЕТ..... 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И  
ИЗДЕЛИЯ ..... 6

**Шевляков В.Ф., Руденко О.В., Анохина Т.Г.,  
Аноп Д.К.**  
РАСЧЁТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ПРОФИЛЕЙ,  
ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ  
ПУЛТРУЗИИ ТОО «ВК-СПЕЦМАТЕРИАЛЫ»,  
С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ..... 6

**Макридин Н.И., Максимова И.Н.**  
ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ  
ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ НОВОГО  
ПОКОЛЕНИЯ..... 13

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
ИЗ ОПЫТА СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ... 25

**Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Юрова В.С.**  
ПРИРОДА МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ  
И ПОДВИЖНОСТЬ БЕТОННОЙ СМЕСИ ..... 30

**Логанина В.И., Зайцева М.В.**  
ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ  
И ОТДЕЛКИ СТЕН ЗДАНИЙ..... 36

**Логанина В.И., Зайцева М.В.**  
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВКОЙ  
ПОЛИСИЛИКАТНОГО РАСТВОРА ..... 42

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ ..... 48

**Монтаев С.А., Досов К.Ж.,  
Адилова Н.Б., Таудаева А.А.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ СЫРЬЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО  
ЗАПОЛНИТЕЛЯ И ПОРИСТОЙ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННО-КОНСТРУКЦИОННОЙ  
СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ..... 54

© Авторы публикаций, 2021

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2021

© ПГУАС, 2021

**Монтаев С.А., Таудаева А.А.,  
Жарылгапов С.М.**  
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА  
НА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ  
НА ОСНОВЕ КРЕМНИСТОЙ  
ПОРОДЫ-ОПОКИ..... 63

**Очкина Н.А.**  
ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНЫХ ФАКТОРОВ  
НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА  
ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ ..... 71

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,  
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ..... 79

**Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб,  
Ефимов О.И., Замалиев Ф.С.,  
Ласьков Н.Н.**  
СЦЕПЛЕНИЕ ЖЁСТКОЙ АРМАТУРЫ  
И ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА ..... 79

**Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб,  
Ефимов О.И., Замалиев Ф.С.,  
Ласьков Н.Н.**  
ПРЕДПОСЫЛКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ  
К НЕЛИНЕЙНОМУ РАСЧЁТУ  
СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК  
ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА С ЖЁСТКОЙ  
АРМАТУРОЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ  
СТАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ..... 88

**Монахов В.А., Зайцев М.Б.**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ  
ПРИНЦИПА ДВОЙСТВЕННОСТИ ..... 96

**Арискин М.В., Мартышкин Д.О.,  
Ванин И.В.**  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ  
НА ВКЛЕЕННЫХ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ ..... 103

**Миряев Б.В., Зотов В.С.**  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ УЗЛОВ ДЕРЕВЯННОГО  
КУПОЛА..... 112

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 119

**Андреев С.Ю., Лебединский К.В.,  
Андреев В.С.**  
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ  
ВОЗДУХА НА КИСЛОРОД И АЗОТ  
В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ  
ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ  
МИКРОЦИКЛОНА ..... 119

**Андреев С.Ю., Яхкинд М.И.,  
Ласьков Н.Н., Князев В.А.**  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ  
ДИСПЕРСИОННОЙ СИСТЕМЫ  
«ВОДА – ВОЗДУХ»..... 128

**Еремкин А.И., Аверкин А.Г.,  
Пономарева И.К.**  
АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ  
АКТУАЛЬНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВРЕДНОСТЕЙ ОТ СГОРАНИЯ СВЕЧЕЙ  
И ВОЗДУХООБМЕНА ДЛЯ ИХ  
АССИМИЛЯЦИИ В ПРАВОСЛАВНЫХ  
КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ..... 137

**Вилкова Н.Г., Мишина С.И.,  
Шумкина А.А.**  
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОГО  
ПОКАЗАТЕЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ  
ТРЕХФАЗНЫХ ПЕН..... 143

АРХИТЕКТУРА..... 151

**Еремкин А.И.**  
ВКЛАД ЖУРНАЛА «РЕГИОНАЛЬНАЯ  
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО»  
И УЧЕНЫХ ПЕНЗЕНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА  
В РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ  
ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ..... 151

**Береговой А.М.**  
СТЕНЫ СО СВОЙСТВАМИ  
ЭНЕРГОАКТИВНОСТИ И УТИЛИЗАЦИИ  
ТЕПЛА ПОМЕЩЕНИЙ ..... 160

**Береговой В.А., Лавров И.Ю.,  
Капустин А.Е.**  
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАМЕННЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ  
ОБЪЕКТОВ ..... 165

Указатель статей,  
опубликованных в 2021 году ..... 172

## Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS..... 6	<b>Ochkina N.A.</b> INFLUENCE OF PRESCRIPTION FACTORS ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF HIGH-DENSITY COMPOSITES.....71	<b>Vilkova N.G., Mishina S.I., Shumkina A.A.</b> EFFECT OF PH ON THE STABILITY OF THREE-PHASE FOAMS..... 145	<b>Beregovoy A.M.</b> WALLS WITH ENERGY ACTIVITY PROPERTIES AND UTILIZATION OF INDOOR HEAT .....160
<b>Shevlyakov V.F., Rudenko O.V., Anokhina T.G., Anop D.K.</b> DESIGN PARAMETERS OF FIBERGLASS FORMS MANUFACTURED BY PULTRUSION METHOD BY VK-SPETSMATERIALY LLC, TAKING INTO ACCOUNT THE TESTING RESULTS..... 6	BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS ..... 79	ARCHITECTURE.....151	<b>Beregovoy V.A., Lavrov I.Y., Kapustin A.E.</b> DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF STONE ELEMENTS DURING THE RESTORATION OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION OBJECTS .....165
<b>Makridin N.I., Maksimova I.N.</b> STRUCTURE OPTIMIZATION AND FORECASTING OF STRUCTURAL STRENGTH OF NEW GENERATION CONCRETE..... 13	<b>Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, Efimov O.I., Zamaliev F.S., Laskov N.N.</b> BONDING BETWEEN RIGID REINFORCEMENT AND CELLULAR CONCRETE .....79	<b>Eremkin A.I.</b> CONTRIBUTION OF THE JOURNAL «REGIONAL ARCHITECTURE AND ENGINEERING» AND SCIENTISTS OF THE PENZA STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION IN THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY OF THE PENZA REGION ..... 152	Index of articles, published in 2021 ..... 174
<b>Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> FROM THE EXPERIENCE OF SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS..... 25	<b>Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, Efimov O.I., Zamaliev F.S., Laskov N.N.</b> PREREQUISITES AND LIMITATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE BEAMS MADE OF AERATED CONCRETE WITH RIGID REINFORCEMENT OF THIN-WALLED STEEL BENT SECTIONS .....88		
<b>Belyakova E.A., Moskvina R.N., Yurova V.S.</b> THE NATURE OF MINERAL FILLERS AND MOBILITY OF CONCRETE MIXTURE ..... 30	<b>Monakhov V.A., Zaytsev M.B.</b> DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF ROD SYSTEM BASED ON PRINCIPLE OF DUALITY .....96		
<b>Loganina V.I., Zaytseva M.V.</b> LIME COMPOUNDS FOR RESTORATION AND DECORATION OF BUILDING WALLS..... 36	<b>Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Vanin I.V.</b> STRESS-STRAIN STATE OF JOINTS ON GLUED FIBERGLASS WASHERS..... 103		
<b>Loganina V.I., Zaytseva M.V.</b> STRUCTURE FORMATION OF LIME COMPOSITIONS WITH A POLYSILICATE SOLUTION ADDITION ..... 42	<b>Miryaev B.V., Zotov V.S.</b> STRESS-STRAIN CONDITION OF WOODEN DOME NODES .....112		
<b>Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> SYSTEM RESEARCH IN MATERIALS SCIENCE..... 48	ENGINEERING SYSTEMS ..... 119		
<b>Montaev S.A., Dosov K.Zh., Adilova N.B., Taudaeva A.A.</b> INVESTIGATION OF RAW MATERIALS FOR CERAMIC AGGREGATES AND POROUS HEAT-INSULATING – STRUCTURAL WALL CERAMICS..... 54	<b>Andreev S.Yu., Lebedinskiy K.V., Andreev V.S.</b> LABORATORY STUDIES OF THE PROCESS OF AIR SEPARATION INTO OXYGEN AND NITROGEN IN THE HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD OF A MICROCYCLE ..... 119		
<b>Montaev S.A., Taudaeva A.A., Zharylgapov C.M.</b> THE INFLUENCE OF THE FIRING TEMPERATURE ON CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WALL CERAMICS ON SILICONY ROCK-OPOKA..... 63	<b>Andreev S.Yu., Yakhkind M.I., Laskov N.N., Knyazev V.A.</b> THEORETICAL ANALYSIS OF PROPERTIES OF A DYNAMIC TWO-PHASE WATER-AIR DISPERSION SYSTEM ..... 128		
	<b>Eremkin A.I., Averkin A.G., Ponomareva I.K.</b> ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON JUSTIFICATION OF THE RELEVANCE OF DETERMINATION OF HARMFULS FROM THE COMBUSTION OF CANDLES AND AIR EXCHANGE FOR THEIR ASSIMILATION IN ORTHODOX RELIGIOUS BUILDINGS ..... 137		

## ЖУРНАЛУ «РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО» – 15 ЛЕТ



В 2021 году исполняется 15 лет со дня выхода первого номера журнала «Региональная архитектура и строительство», который изначально предназначался для публикации результатов научных исследований ученых и специалистов, соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук в области архитектуры и строительства Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, вузов Поволжья, России, а также зарубежных авторов. Изданию журнала способствовали усилия со стороны ректората (д.т.н., профессор, советник РААСН Еремкин А.И.) и бессменного главного редактора журнала (д.т.н., профессор, советник РААСН Данилов А.М.). Учредителем является ПГУАС. Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законо-

дательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ №ФС77-25956 от 13.10.2006; индекс издания в каталоге Роспечати – 36946).

С учетом вклада журнала и ученых ПГУАС в развитие строительной отрасли Пензенской области и России в целом при поддержке губернатора Пензенской области журнал был включен в Перечень ВАК (содержится во всех редакциях с 2010 г.); сегодня занимает одно из ведущих мест в рейтинге журналов в рассматриваемой области; имеет высокий импакт-фактор; индексируется в RSCI на платформе WoS.

За последние годы университет стал современным образовательным и научным центром как в регионе, так и в России с кадровым потенциалом, обеспечивающим подготовку высококвалифицированных специалистов для архитектурно-строительного комплекса, жилищно-коммунального хозяйства, дорожного строительства и других отраслей рыночной экономики. Активизировалась деятельность всех подразделений и общественных организаций вуза, ведется интенсивная работа по внедрению в практику научно-технических разработок и привлечению внимания общественности к проблемам и достижениям университета. Результатами научно-технической деятельности профессорско-преподавательского состава являются фундаментальные научно-исследовательские, научно-прикладные разработки, современные и перспективные. Очевидны успехи коллектива ПГУАС на рынке образовательных услуг, что способствует укреплению экономики вуза и Пензенского региона. Значительную роль в этом сыграло и издание журнала «Региональная архитектура и строительство».

Пропаганда достижений научных школ и направлений университета, публикация в журнале статей ведущих ученых Поволжья и России, несомненно, оказывают значительное влияние на решение задач региональной архитектуры и строительства. Разными были годы издания журнала, не простыми являются и последние. К счастью, налицо повышение интереса со стороны государства к развитию образования. Молодежь стремится к получению современных знаний в области архитектуры и строительства. Необходимость накопления инновационного материала все более требует научного сопровождения учебного процесса, развития фундаментальных и прикладных исследований и внедрения их результатов. Поэтому выпуски журнала и дальше будут содействовать росту научного потенциала вузов региона и реализации научно-практических разработок в области строительства и архитектуры.

*Ректорат, редакция и редакционный совет журнала благодарят авторов и рецензентов за участие в работе журнала. Желаем всем творческих успехов, осуществления планов и воплощения задуманного.*

Ректор  
Пензенского государственного университета  
архитектуры и строительства

С.А. Болдырев

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 692.52

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева

Респ. Казахстан, 070004,  
г. Усть-Каменогорск,  
ул. Протазанова А.К., д.69

**Шевляков Владимир Федорович**, кандидат технических наук, ассоциированный профессор школы архитектуры, строительства и дизайна  
E-mail: shevlyakovvf08@mail.ru

**Руденко Ольга Владимировна**, кандидат технических наук, декан школы архитектуры, строительства и дизайна  
E-mail: o\_rudenko\_vkgtu@mail.ru

**Аноп Дарья Камильевна**, кандидат технических наук, и.о. ассоциированного профессора школы архитектуры, строительства и дизайна  
E-mail: darjagalkina@mail.ru

ООО «VKSM-НСК»

Россия, 630049, г. Новосибирск, Красный пр-кт, зд. 153г, офис 32

**Анохина Татьяна Геннадьевна**, директор ООО «VKSM-НСК»  
E-mail: vkspmat\_nsk@mail.ru

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University

Rep. Kazakhstan, 070004, Ust-Kamenogorsk, 69, Protazanov A.K. St.,

**Shevlyakov Vladimir Fedorovich**, Candidate of Sciences, Associate Professor of the School of Architecture, Construction and Design  
E-mail: shevlyakovvf08@mail.ru

**Rudenko Olga Vladimirovna**, Candidate of Sciences, Head of the School of Architecture, Construction and Design  
E-mail: o\_rudenko\_vkgtu@mail.ru

**Anop Darya Kamilyevna**, Candidate of Sciences, Acting Associate Professor of the School of Architecture, Construction and Design  
E-mail: darjagalkina@mail.ru

LLC «VKSM-NSK»

Russia, 630049, Novosibirsk, Krasny ave., zd. 153g, office 32

**Anokhina Tatyana Gennadievna**, Head of the LLC «VKSM-NSK»  
E-mail: vkspmat\_nsk@mail.ru

### РАСЧЁТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ПРОФИЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ ОО «VK-СПЕЦМАТЕРИАЛЫ», С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

В.Ф. Шевляков, О.В. Руденко, Т.Г. Анохина, Д.К. Аноп

Приведены результаты определения расчетных характеристик стеклопластиковых профилей, изготавливаемых методом пултрузии, на основании проведения их испытаний.

Ключевые слова: стеклопластиковые профили, расчетные характеристики, испытание стеклопластиковых профилей, метод пултрузии

## DESIGN PARAMETERS OF FIBERGLASS FORMS MANUFACTURED BY PULTRUSION METHOD BY VK-SPETSMATERIALY LLC, TAKING INTO ACCOUNT THE TESTING RESULTS

V.F. Shevlyakov, O.V. Rudenko, T.G. Anokhina, D.K. Anop

The results of determining the design parameters of fiberglass forms manufactured with pultrusion method based on their testing results.

*Keywords: fiberglass forms, design parameters, testing of fiberglass forms, pultrusion method*

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются [1] во всех отраслях народного хозяйства. В строительстве используется значительное количество полимерных материалов (ПМ) в основном для ограждающих (несущих) конструкций, тепло- и звукоизоляционных материалов и деталей сантехники. Всё большее распространение получают стеклопластиковые изделия и конструкции с применением стекловолокон. ТОО «VK-Спецматериалы» (г. Усть-Каменогорск) изготавливают: технологические трубопроводы и газоходы методом намотки; решётчатые настилы методом литья; стеклопластиковые профили методом пултрusion. Первоначально профили применялись в виде ограждающих конструкций (ограждения, обрамление проёмов, поручни, перила), изделий и конструкций под незначительные нагрузки (электроизоляционные лотки, лестницы, стремянки, изолирующие подставки). В настоящее время всё большую актуальность приобретает вопрос применения в несущих конструкциях стеклопластиковых профилей [2]. Профили обладают низким удельным весом (плотность 1700-2000 кг/м<sup>3</sup>), который сравним с объёмным весом бетона (2400 кг/м<sup>3</sup>) [3, прил. А, табл. А.1] и в 4,6-3,6 раза меньше веса стали (плотность 7850 кг/м<sup>3</sup>) [4]. Пределы прочности при растяжении (240 МПа) и сжатии (220 МПа) вдоль волокон [2] сравнимы с пределом текучести разных марок стали СТЗ (185-275 МПа) [4, табл. 51] и значительно выше прочности бетона при сжатии основных применяемых классов В15-В40 (8,5-22 МПа) [5, табл. 6.8]. Основной причиной все возрастающего интереса к стеклопластиковым профилям являются не столько прочностные характеристики, сколько высокая стойкость к агрессивным средам, диэлектрические свойства (диэлектрик), высокая стойкость к ультрафиолетовому излучению, значительный диапазон рабочих температур (-100 °С...+180 °С) [2]. Причиной все большего применения стеклопластиковых профилей в виде несущих балок и стоек при проектировании ходовых площадок (нагрузка на площадки 165 кН) в промышленном цеху (г. Усть-Каменогорск) стала агрессивная среда. Норм по проектированию с использованием стеклопластиковых профилей в Республике Казахстан нет. Еврокоды, внедрённые в Республике Казахстан, не содержат норм расчёта с применением стеклопластиковых профилей, но допускают, чтобы расчёты строительных конструкций при проектировании выполнялись на основании испытаний [6]. Ранее был разработан стандарт на стеклопластиковые профили [2], в котором установлены физико-механические характеристики материала, но для расчёта профилей в составе конструкций необходимо иметь их прочностные и деформативные характеристики с учётом работы в виде балок и стоек.

### *Программа определения расчётных характеристик профилей*

Из всего набора выпускаемых стеклопластиковых профилей (с сечениями в виде швеллера, трубы прямоугольного сечения, двутавра, уголка, трубы круглого сечения) приняты для исследований с учётом возможности ТОО профиль-труба прямоугольного сечения и профиль двутаврового сечения (полярные по разрушающим нагрузкам). Программа определения расчётных характеристик состояла в следующем.

1. Определение расчётных геометрических характеристик стеклопластиковых профилей (по полной программе выпуска профилей по заданию).
2. Разработка программы и методик испытаний для определения прочностных и деформативных характеристик профилей.

3. Проведение испытаний.

4. Установление по результатам испытаний расчётных прочностных и деформативных характеристик для применения при проектировании.

По результатам испытаний и определения расчётных характеристик составлены рекомендации [7] по расчёту конструкций из стеклопластиковых профилей, изготавливаемых методом пултрusion по технологии и с материалами, применяемыми в ТОО «VK-Спецматериалы». Для изготовления профилей используется линия пултрusion (рис. 1), в результате прохождения которой при непрерывном протягивании стекловолоконистых материалов, пропитанных смолой, через фильеру, нагретую до 130-150 °С и образующую форму сечения, получают изделия неограниченной длины. При изготовлении профилей применяются смола, стекловолокна, ускоритель отвердителя, красящие пигменты.

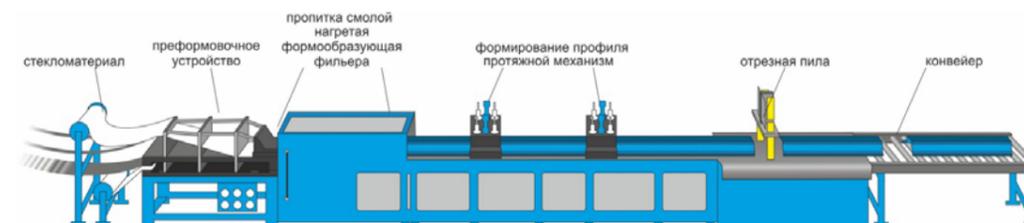


Рис. 1. Технологическая линия изготовления стеклопластиковых профилей методом пултрusion

**Расчётные геометрические характеристики** (площадь сечения, статический момент, момент инерции, момент сопротивления относительно верхней и нижней граней сечения, положение нейтральной оси, радиус инерции) определены относительно двух взаимно перпендикулярных осей ( $x$  и  $y$ ) по полной номенклатуре выпускаемых профилей, имеющих сечения: двутавра, швеллера, уголка и трубы прямоугольного профиля. Подсчёты выполнены по номинальным геометрическим размерам с целью обеспечения возможности корректировки по результатам измерений изготовленной продукции.

**Подготовка к испытаниям заключалась** в выборе профилей, определении схем испытания, разработке методик испытаний. Выбраны имеющиеся в наличии, наиболее востребованные на данный момент профиль с сечением двутавра (200×100×10 мм) и профиль-труба с сечением прямоугольника (80×32×3(4) мм). Профили испытаны на изгиб по схеме балки, нагруженной двумя силами, с пролётом 1 м и пролётом среза 0,35 м в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и по схеме колонн на центральное сжатие. Для испытаний балок и колонн разработаны методики испытаний, аналогичные методикам испытаний железобетонных и металлических конструкций. Для определения фактических предельных напряжений материала профилей изготовлены и испытаны образцы. Образцы вырезаны из одной заготовки с испытываемыми профилями – балками и колоннами. Поскольку заготовки (профили) могут изготавливаться неограниченной длины, то одна заготовка включала 2 балки, колонну, образцы, испытываемые на поперечный изгиб, на чистый изгиб, на растяжение, на сжатие. Это было необходимо для определения по образцам фактических прочностных и деформативных характеристик балок и колонн.

Методики испытаний образцов принимались по действующим ГОСТам на испытания и составлялись под конкретные размеры образцов и имеющееся оборудование.

**Проведение испытаний.** Балки двутаврового (рис. 2) и в виде прямоугольной трубы (рис. 3) сечений испытывались на чистый изгиб при нагружении двумя силами с помощью силовой установки PZA (г. Лейпциг, Германия). В балках контролировались вертикальные перемещения (прогибы) и деформации крайних граней с помощью тензометров.

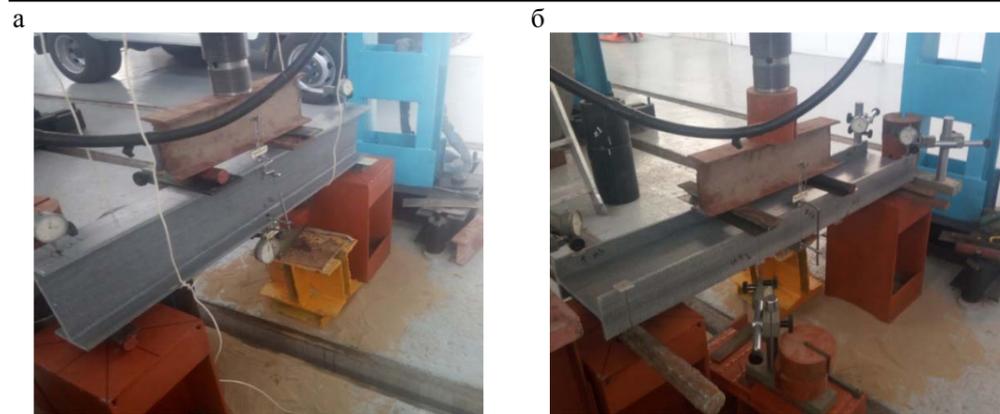


Рис. 2. Вид двутавровой балки:

а – с полками, расположенными горизонтально, при разрушении; б – с вертикально расположенными полками перед испытанием

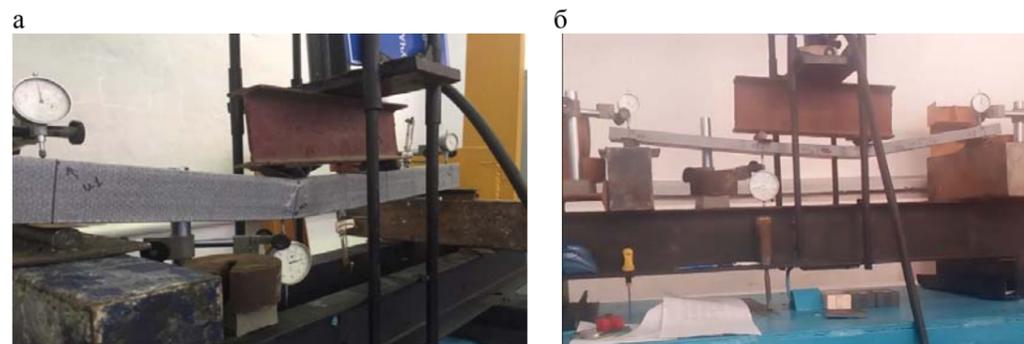


Рис. 3. Вид балки-трубы прямоугольного сечения в момент разрушения:

а – при расположении сторон 80 мм вертикально; б – со стороной 80 мм, расположенной горизонтально

Профили-колонны двутаврового и коробчатого сечений (рис. 4) испытывались на центральное сжатие на прессах с усилием 1000 кН и 750 кН.



Рис. 4. Вид колонны при разрушении:

а – двутаврового сечения; б – коробчатого сечения (труба прямоугольного сечения)

Все испытания выполнялись в аккредитованной лаборатории Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева.

**Основные результаты испытаний.** Величина разрушающей нагрузки, прогибы и деформации (на базе тензометра 20 мм) сжатой (верхней) и растянутой (нижней)

граней балок составили: для двутавра при горизонтальном расположении полок –  $P_p=50$  кН,  $f=4,48$  мм (при  $P_p$  в середине пролета),  $\Delta l_c=0,013$  мм,  $\Delta l_i=0,025$  мм; для двутавра при вертикальном положении полок –  $P_p=45$  кН,  $f=18,55$  мм (средний, при  $P=3,8$  кН, на расстоянии 35 см от опоры балки),  $\Delta l_c=0,046$  мм,  $\Delta l_i=0,050$  мм (при  $P=1,8$  кН); для трубы-прямоугольника при вертикальном положении стенок 80 мм –  $P_p=13,49$  кН,  $f=9,94$  мм (при  $P=12,78$  кН, на расстоянии 35 см от опоры балки),  $\Delta l_c=0,040$  мм,  $\Delta l_i=0,047$  мм (при  $P_p=12,78$  кН); для трубы-прямоугольника при горизонтальном положении стенок 80 мм –  $P_p=8,875$  кН,  $f=33,19$  мм (при  $P_p=8,875$  кН),  $\Delta l_c=0,049$  мм (при  $P_p=8,875$  кН),  $\Delta l_i=0,047$  мм (при  $P=7,1$  кН).

Близость разрушающих нагрузок балок из профилей двутавров (50 кН и 45 кН), испытанных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, имеющих различные моменты сопротивления ( $224,349$  см<sup>3</sup> и  $32,97$  см<sup>3</sup>, фактические), сопровождается потерей устойчивости по длине из плоскости балки при горизонтальном положении полок и вертикальном ребра. При разрушении двутавровой балки при нагрузке 50 кН на опоре в ребре у нижней полки образовались горизонтальные трещины. Верхняя полка отклонилась у опор в разные стороны, вертикальное ребро искривилось в разные стороны максимально у опор балки, а нагрузка стала падать (см. рис. 2).

Перед разрушением балки при нагрузке 42 кН в верхней части вертикальных полок появились белые участки, являющиеся признаками начала разрушения, а ниже располагались белые горизонтальные полосы длиной до 80 мм. При нагрузке 45 кН в месте соединения ребра и полок (середина высоты полок) в пролётах среза появилась белая полоса-трещина, ниже которой также образовались горизонтальные трещины. У нижних граней полок под опорами траверсы образовались горизонтальные полосы-трещины до 5-10 см длиной и более длинные горизонтальные трещины, расположенные по высоте полок. Нагрузка падала, а прогибы увеличивались, т.е. произошло разрушение.

Разрушающие нагрузки балок-труб прямоугольного сечения, испытанных в двух взаимно перпендикулярных направлениях (13,49 кН и 8,875 кН) соответствуют моментам сопротивления  $14,419$  см<sup>3</sup> ( $15,1$  см<sup>3</sup>) и  $7,97$  см<sup>3</sup> ( $7,957$  см<sup>3</sup>), определённым по фактическим размерам. Разрушение балки при  $P_p=13,49$  кН произошло в месте максимального момента под опорой траверсы от раздавливания верхней горизонтальной стенки и части вертикальных стенок, на которых образовались небольшие по длине трещины в виде белых пятен. На нижней грани балки трещины не образовались. Разрушение балки при  $P_p=8,875$  кН произошло с образованием резкого звука-треска. Балка резко и заметно просела у одной опоры траверсы. Разрушение произошло у верхней грани балки под опорой траверсы от смятия сжатой верхней горизонтальной стенки и смятия верхней части вертикальных стенок на участке до 15 см по длине. Общей потери устойчивости балок не было, что объясняется формой сечения в виде прямоугольника-коробки, в котором вертикальные стенки, обеспечивающие устойчивость, разнесены на некоторое расстояние.

Колонна двутаврового сечения разрушилась при сопровождении резкого звука-треска, и можно утверждать – хрупко. Обе полки изогнулись, потеряв устойчивость (см. рис. 4а), но восстановились после снятия нагрузки. В ребре у полок и в стыках ребра с полками образовались вертикальные полосы-трещины, что указывает на разрыв ребра и стыков ребра с полками в горизонтальном направлении. Колонна стеклопластикового профиля коробчатого сечения разрушилась при резком звуке-треске. Одна вертикальная стенка (сторона сечения) изогнулась по дуге максимально в середине (см. рис. 4б), оторвавшись от основной колонны с обоих вертикальных краёв по горизонтали. Можно констатировать, что разрушение произошло от разрыва в горизонтальном направлении и потери устойчивости сторон сечения (стенок). Общая устойчивость колонн (гибкость) обеспечивалась их небольшой длиной.

**Установление расчётных характеристик.** Результаты испытаний образцов учтены при разработке расчётных характеристик. Для расчёта проектируемых конструкций установлены следующие характеристики: расчётные геометрические размеры сечений профилей; расчётные характеристики для расчёта изгибаемых, внецентренно сжатых и растянутых профилей.

Максимальные единичные и средние отклонения от номинальных размеров сечений двутавров, полученные по результатам замеров (84 замера), имели следующие величины: по толщине ребер и полок – (+10,9%), (-7%) и (-3,6%); по ширине сечения – (+0,17%), (-1%) и (+0,035%), (-0,12%); по высоте сечения – (-0,4%) и (-0,475%).

Максимальные единичные и средние отклонения от размеров сечения профиля трубы следующие: по толщине коротких стенок – (+14,5%), (-17%) и (-6,75%); по толщине длинных стенок – (+50,67%) и (+42,41%); по ширине сечения – (-7,68%) и (-7%); по высоте сечения – (-0,7%) и (-0,44%). При этом максимальные отклонения толщин двух коротких стенок составляют (+12,5%) и (-9,31%), а двух длинных стенок – (+44,8%).

#### Выводы по геометрическим размерам сечений

**Для сечения двутавра.** Учитывая максимальные отрицательные отклонения размеров сечений двутавров от номинальных размеров (-3,6) и (-7), приходим к выводу, что возможно применение коэффициента, равного  $k_p=1,05$ , на который следует делить расчётное сопротивление. При фактических положительных отклонениях от номинальных размеров допускается использовать коэффициент  $k_p=1,0$ .

**Для профиля трубы.** Учитывая максимальные отклонения парных коротких стенок профиля (-9,31%), утверждаем, что возможно применение коэффициента  $k_k=1,1$ , на который следует разделить расчётное сопротивление. Отклонения от номинальных размеров длинных стенок профиля всегда положительные. Неодинаковые размеры толщины парных стенок создают дополнительные эксцентриситеты при сжатии и крутящие моменты при изгибе. Поэтому при положительных отклонениях от номинальных размеров длинных стенок профиля-трубы возможно применение коэффициента  $k_k=1,0$ .

**Расчётные характеристики профилей.** По результатам испытаний расчётом определены максимальные разрушающие напряжения при сжатии центрально-сжатых элементов и образцов. Методом вероятностной оценки определено расчётное сопротивление сжатию, которое получило название – расчётное сопротивление сжатию вдоль волокон в направлении  $0^\circ$  при кратковременной нагрузке, и принято равным  $f_{c,0^\circ,d}=107$  МПа. Получен коэффициент перехода от прочности при сжатии вдоль волокон в направлении  $0^\circ$  к расчётному сопротивлению, который принят равным  $k_c=0,486$ . Расчётное сопротивление сжатию вдоль волокон в направлении  $0^\circ$  при длительной нагрузке принято с учётом коэффициента перехода  $k_l=0,405$ , полученного из анализа данных аналогичных стеклопластиков, равным  $f_{c,0^\circ,d,l}=43,335$  МПа. Аналогично получены расчётные сопротивления при изгибе (для расчёта изгибаемых и внецентренно сжатых элементов) и расчётные сопротивления при растяжении (для расчёта растянутых элементов), применяемые при действии кратковременных и длительных нагрузок. Коэффициент перехода к расчётному сопротивлению при изгибе  $k_m=0,485$ , а при растяжении  $k_t=0,486$ . Аналогично получены модули упругости для расчёта прогибов изгибаемых элементов. Расчётные сопротивления и модули упругости даны в таблице.

Расчётные сопротивления и модули упругости стеклопластиковых профилей  
(кратковременные – кратк., длительные – длит.)

Расчётное сопротивление сжатию вдоль волокон $0^\circ$ , МПа		Расчётное сопротивление при изгибе, МПа		Расчётное сопротивление при растяжении, МПа		Модуль упругости при изгибе, ГПа	Примечания
кратк.	длит.	кратк.	длит.	кратк.	длит.		
107	43,335						
		115	47			11,95	Ось у, двутавр Ось х, двутавр
		19	8			9,119	
		76	31			32,8	Ось у, труба Ось х, труба
		95	38			36,8	
				117	47		

#### Список литературы

1. Берлин, А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / А.А. Берлин. – 5-е изд., испр. и доп. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2018. – 624 с.
2. СТ-949-1917-01-ТОО-02-2017. Изделия стеклопластиковые. Технические условия.
3. СП РК EN 1991-1-1: 2002/2011. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Собственный вес, постоянные и временные нагрузки на здания. – Астана, 2016. – 40 с.
4. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, 1988. – 86 с.
5. СНиП 52-01-03. СП 6313330.2012. Актуализированная редакция. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М., 2012. – 155 с.
6. СП РК EN 1990:2002 + А1: 2005/2011. Основы проектирования несущих конструкций / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства национальной экономики Республики Казахстан. – Астана, 2016. – 109 с.
7. Шевляков, В.Ф. Рекомендации по расчёту конструкций из стеклопластиковых профилей, изготавливаемых методом пултрузии ТОО «ВК-Спецматериалы» / В.Ф. Шевляков, Т.Г. Анохина, О.В. Руденко. – Усть-Каменогорск: ТОО «ВКПК АРГО», 2020. – 69 с.

#### References

1. Berlin, A.A. Polymeric composite material: structure, properties, technology / A.A. Berlin. – 5th revision, revised and corrected. – Saint- SPB.: (Instant Printing Center) “Profession”, 2018. – 624 p.
2. ST-949-1917-01-TOO-02-2017. Glass-reinforced plastics articles. Technical specification.
3. SP RK EN 1991-1-1: 2002/2011. Effect on load-bearing elements. Part 1-1. Dead load, dead and live loads on buildings. – Astana, 2016. – 40 p.
4. SNiP II-23-81\*. Constructional steel work / Gosstroy, USSR. – M.: Central Institute of Standard Designing, 1988. – 86 p.
5. SNiP 52-01-03. SP 6313330.2012. Updated version. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. – M., 2012 – 155 p.
6. SP RK EN 1990:2002 + A1: 2005/2011. Design basis for load-bearing elements / Committee for Construction and Housing and Utilities Infrastructure of Ministry for the National Economy of Kazakhstan Republic. – Astana, 2016. – 109 p.
7. Shevlyakov, V.F. Recommendations on construction design from fiberglass forms manufactured with pultrusion method by VK-Spetsmaterialy LLC / V.F. Shevlyakov, T.G. Anokhina, O.V. Rudenko. – Ust-Kamenogorsk: VKPK AGRO LLC, 2020. – 69 p.

УДК 691.327:539.4

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

**Макридин Николай Иванович**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
**Максимова Ирина Николаевна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»  
E-mail: maksimovain@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

**Makridin Nikolai Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
department «Technology of Building Materials  
and Woodworking»  
**Maksimova Irina Nikolaevna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Quality Management and  
Construction Technologies»  
E-mail: maksimovain@mail.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

По результатам собственных обширных экспериментов по изучению влияния технологических и физико-химических факторов на оптимизацию структуры и трещиностойкость цементных композитов нового поколения на ранних и поздних стадиях структурообразования и твердения проведен анализ факторов влияния на структуру и параметры конструкционной прочности бетонов с позиций структурной механики разрушения материалов по ГОСТ 29167-91 при неравновесных механических испытаниях потери устойчивости процесса деформирования образца, при этом сравниваемые серии образцов были изготовлены на двух видах портландцемента одинаковой марки по прочности – на добавочном и бездобавочном портландцементах.

*Ключевые слова: оптимизация, структура, прочность, прогнозирование, цементные композиты, деформация, механическое поведение, стадии структурообразования.*

### STRUCTURE OPTIMIZATION AND FORECASTING OF STRUCTURAL STRENGTH OF NEW GENERATION CONCRETE

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

Based on the results of our own extensive experiments of studying the influence of technological and physicochemical factors on the optimization of the structure and crack resistance of new generation cement composites at the early and late stages of structure formation and hardening, an analysis of the factors influencing the structure and parameters of the structural strength of concrete was carried out from the point of structural mechanics of materials destruction according to GOST 29167-91 in non-equilibrium mechanical tests of stability loss of the deformation process of the sample, while the compared series of samples were made on two types of Portland cement of the same strength grade on additive and non-additive Portland cements.

*Keywords: optimization, structure, strength, prediction, cement composites, deformation, mechanical behavior, stages of structure formation.*

Расширение областей применения и повышение требований к конструкционным свойствам цементных композитов привели к необходимости более глубокого понимания материаловедческих функций зависимости критериев прочности, надежности и долговечности от механики и технологии, состава и структуры конструкционных композитов путём комплексной оценки сравнительных испытаний механического поведения под нагрузкой опытных образцов разного состава и структуры с позиций

как механики деформируемого твердого тела (МДТТ), так и структурной механики разрушения материалов (СМРМ).

По Ахвердову И.Н. и Гвоздеву А.А., раскрытие функциональной связи между действующими напряжениями и деформациями  $\sigma = f(\varepsilon)$  является важнейшим направлением МДТТ и одним из основных этапов в изучении механического поведения цементных систем, так как в диаграмме сжатия и растяжения отражается связь деформативных и прочностных свойств любых твердых тел конструкционного назначения, которые в принципе можно получить только экспериментальным путем.

Исследования функциональной связи между действующими напряжениями и деформациями как на плотных, так и на пористых заполнителях позволили связать характерную форму этой кривой с физическими процессами деформирования и разрушения конструкционных бетонов. Для практических оценок диаграмм состояния под кратковременной нагрузкой необходимо располагать данными по крайней мере о двух параметрах кривой  $\sigma - \varepsilon$ : начальном модуле деформации и предельной деформации, которые применяют для расчета элементов конструкций и которые существенно зависят от особенностей структуры композита.

По Бергу О.Я., механическое поведение композита наиболее отчетливо проявляется при анализе его объемных деформаций, так как анализ объемного деформирования бетона при сжатии (основном виде сопротивления материала в конструкции) и изменении величин модуля деформации и дифференциального коэффициента поперечной деформации с нагрузкой показывает, что по диаграмме состояния бетона можно судить об изменениях указанных характеристик деформирования.

В результате изучения природы механического поведения цементных дисперсных систем и установления закономерностей процессов структурообразования и твердения в ходе многочисленных исследований [1–12] установлено, что модифицирование бетонных смесей и бетонов химическими добавками является рациональным способом регулирования их структуры и свойств. Большое практическое значение имеют комплексные добавки, обладающие полифункциональным действием. Одним из таких модификаторов является добавка ПДО-М – комплексная ускоряюще-пластифицирующая добавка, приготовленная на основе отходов предприятий ОАО «Марбиофарм». Основные компоненты добавки, разработанной в соответствии с [13], – сульфат натрия (отход производства аскорбиновой кислоты), действующий как ускоритель твердения, и последрожжевой остаток от производства кормовых дрожжей, действующий как пластификатор.

Проблема нарастания и регулирования прочности цементной дисперсной системы во времени по своей практической значимости остается в центре внимания как отечественных, так и зарубежных исследователей. Эта проблема приобретает особое значение в современных условиях поиска путей получения и областей применения в строительстве бетонов нового поколения, в том числе высокофункциональных, с очень высокими показателями прочности, однородности и низкой пористости, в основу производства которых положена новая концепция бетоноведения – получение высокоподвижной матричной фазы бетонной смеси с низким водосодержанием благодаря комплексному использованию химических и минеральных добавок, обладающих высокой реологической эффективностью.

Комплексная методология оценки структурно-механических параметров конструкционной прочности гидратных структур позволяет получать новые, более дифференцированные характеристики, отражающие синергетические эффекты взаимовлияния конструкционных и деструктивных процессов структурообразования и твердения цементных дисперсных систем и обусловленные концентрацией и качественными показателями (крупности, удельной поверхности, состояния поверхности) дисперсной фазы цементных композитов, позволяющими более надежно судить о механическом поведении материала под нагрузкой, благодаря чему можно переходить от простого определения параметров качества к активному управлению качеством материала.

Если исходить из принятой в исследовательской практике двухкомпонентной мезо- и макроструктурной модели композитного материала, то важнейшими структурными элементами композита являются цементный камень (матрица), зерно заполнителя (дисперсная фаза) и их сцепление. С позиций структурной механики разрушения композитных материалов реальная прочность материала связывается с его энергией разрушения, модулем упругости и размером трещины, обуславливающим начало разрушения. При этом предсказано теоретически и показано экспериментально влияние дисперсной фазы на три указанных фактора, от которых зависит прочность.

Исходя из цели и задач исследования были проведены обширные эксперименты по изучению влияния технологических и физико-химических факторов на оптимизацию структуры и трещиностойкости цементных композитов нового поколения с позиций структурной механики разрушения материалов по ГОСТ 29167-91 на образцах типа I. На каждом опытном образце комплексно оценивали следующие параметры его механического поведения при неравновесных механических испытаниях потери устойчивости процесса деформирования образца:  $R_{bf}$  – прочность на растяжение при изгибе;  $R_{сж}$  – прочность на сжатие на половинках образца после испытаний на растяжение при изгибе;  $F_c^*$  – нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины;  $K_{1c}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке;  $V$  – прогиб образца;  $G_F$  – удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение;  $\mathcal{E}_{AЭ}$  – энергия акустической эмиссии образца на диаграмме нагружения;  $N_1(A_1)/N_2(A_2)$  – параметр акустической эмиссии, отражающий отношение количества ультразвуковых импульсов акустической эмиссии с амплитудой  $A_1$  к количеству ультразвуковых импульсов акустической эмиссии с амплитудой  $A_2$  [7].

Были изготовлены опытные образцы бетона типа I размером 40×40×160 мм с острой клиновидной трещиной глубиной 13 мм, которая получается в процессе формования образцов за счет крепления на одной из боковых граней металлической формы специальной клиновидной вставки. Как следует из данных, приведенных в табл. 1 и 2, при изготовлении 25 серий опытных образцов на каждом виде портландцемента был принят одинаковый расход цемента, который для отдельных сравниваемых серий составлял: 250; 289; 385; 481 и 520 кг/м<sup>3</sup>. Одинаковым был принят расход мелкого заполнителя на основе сурского речного песка с  $M_{кр}=1,63$ , высокопрочного гранитного щебня фракции 5–10 мм, химической добавки ПДО-М в количестве 0,3; 1,0; 1,7 и 2,0 % от массы цемента во всех сравниваемых сериях на двух видах портландцемента. При этом удобоукладываемость бетонной смеси всех сравниваемых составов была одинаковой и составляла 2–4 см осадки конуса.

Сравнение различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества бетона представлено в табл. 1 и 2 на примере 25 составов сравниваемых серий, изготовленных на двух видах портландцемента. Один из них М500-Д0 (ЗАО «Осколцемент») с нормальной плотностью 0,257, другой – М500-Д20 (ОАО «Вольскцемент») с нормальной плотностью 0,285.

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно, что при получении бетонной смеси постоянной удобоукладываемости на старооскольском цементе с использованием добавки ПДО-М можно добиться снижения расхода воды на 11–18 %, что позволяет отнести ПДО-М к водоредуцирующей добавке второй группы по ГОСТ 24211-2003. В бетонных же смесях на основе вольского цемента ПДО-М расход воды сокращается на 23–25 %, что дает основание отнести ПДО-М к водоредуцирующей добавке первой группы. Изменение водоредуцирующей способности добавки ПДО-М на сравниваемых цементах, вероятнее всего, обусловлено наличием минеральной добавки в вольском портландцементе.

Т а б л и ц а 1

Технологические и физико-химические факторы оптимизации структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д20 (ОАО «Вольскцемент»)

Образцы серии	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
1в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+7,4+3	77	570
2в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+7,4+3	77	570
3в	481	615	1100	216	0,3	0,45	12+2+7,4+3	77	570
4в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+7,4+3	77	570
5в	481	615	1100	211	1,7	0,438	12+2+4,6+3	77	354
6в	289	932	1100	214	1,7	0,740	12+2+4,6+3	77	354
7в	481	615	1100	216	0,3	0,45	12+2+4,6+3	77	354
8в	289	932	1100	218	0,3	0,754	12+2+4,6+3	77	354
9в	481	615	1100	216	1,7	0,45	12+2+7,4+3	63	466
10в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
11в	481	615	1100	207	0,3	0,43	12+2+7,4+3	63	466
12в	289	932	1100	214	0,3	0,741	12+2+7,4+3	63	466
13в	481	615	1100	216	1,7	0,45	12+2+4,6+3	63	290
14в	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
15в	481	615	1100	207	0,3	0,431	12+2+4,6+3	63	290
16в	289	932	1100	214	0,3	0,74	12+2+4,6+3	63	290
17в	520	497	1100	201	1,0	0,386	12+2+6+3	70	420
18в	250	917	1100	190	1,0	0,76	12+2+6+3	70	420
19в	385	774	1100	171	2,0	0,445	12+2+6+3	70	420
20в	385	774	1100	229	0,0	0,595	12+2+6+3	70	420
21в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+8+3	70	560
22в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+4+3	70	280
23в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	80	480
24в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	60	360
25в	385	774	1100	175	1,0	0,454	12+2+6+3	70	420

Т а б л и ц а 2

Технологические и физико-химические факторы оптимизации структуры и параметров конструкционной прочности цементных композитов на портландцементе марки М500-Д0 (ЗАО «Осколцемент»)

Образцы серии	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг					В/Ц	Режим ТВО, ч	Температура изотермии, °С	ТВО, °С·ч
	Ц	П	Щ	В	ПДО-М, % от массы Ц				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+7,4+3	77	570
2с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+7,4+3	77	570
3с	481	615	1100	201	0,3	0,419	12+2+7,4+3	77	570
4с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	77	570
5с	481	615	1100	196	1,7	0,407	12+2+4,6+3	77	354
6с	289	932	1100	229	1,7	0,792	12+2+4,6+3	77	354
7с	481	615	1100	201	0,3	0,419	12+2+4,6+3	77	354
8с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	77	354
9с	481	615	1100	216	1,7	0,449	12+2+7,4+3	63	466

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+7,4+3	63	466
11с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+7,4+3	63	466
12с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+7,4+3	63	466
13с	481	615	1100	216	1,7	0,449	12+2+4,6+3	63	290
14с	289	932	1100	220	1,7	0,761	12+2+4,6+3	63	290
15с	481	615	1100	207	0,3	0,430	12+2+4,6+3	63	290
16с	289	932	1100	240	0,3	0,830	12+2+4,6+3	63	290
17с	520	497	1100	164	1,0	0,315	12+2+6+3	70	420
18с	250	917	1100	194	1,0	0,776	12+2+6+3	70	420
19с	385	774	1100	171	2,0	0,444	12+2+6+3	70	420
20с	385	774	1100	207	0,0	0,538	12+2+6+3	70	420
21с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+8+3	70	560
22с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+4+3	70	280
23с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	80	480
24с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	60	360
25с	385	774	1100	185	1,0	0,48	12+2+6+3	70	420

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, видно также, что влияние режима тепло-влажностной обработки на изменение параметров длительной конструкционной прочности сравниваемых серий цементных композитов контролировали по температуре изотермии и времени выдержки при этой температуре, то есть по показателю ТВО, °С·ч.

Комплексная оценка на каждом опытном образце совокупности показателей параметров длительной конструкционной прочности на ранней стадии структурообразования и твердения сравниваемых серий образцов бетонов в возрасте 90 суток и на поздней стадии – в возрасте 6570 суток (18 лет) – дала обширный экспериментальный материал для сравнительного анализа и получения кинетических зависимостей процессов структурообразования и твердения, позволяющих обосновывать новые подходы к проблеме прочности и механического поведения конструкционных материалов на диаграмме неравновесного нагружения по ГОСТ 29167-91. В основу данных подходов положено детальное изучение самого процесса разрушения в реальном масштабе времени с помощью метода акустической эмиссии, понимание которого дает возможность не только выявлять параметры материала, определяющие его силовые и энергетические характеристики трещиностойкости, но и знать эти параметры, чтобы использовать их при проектировании гетерогенных цементных систем с повышенной трещиностойкостью.

Результаты комплексной оценки совокупности показателей параметров конструкционной прочности  $R_{bf}$  и  $R_{сж}$  на ранних и поздних стадиях структурообразования и твердения цементных композитов сравниваемых серий приведены в табл. 3–6.

Сравнительный анализ численных значений прочности  $R_{bf}$  и  $R_{сж}$  на двух видах портландцемента в рассматриваемом диапазоне времени гидратационного твердения с учетом влияния технологических и физико-химических факторов показывает заметное влияние вида портландцемента на значения  $R_{bf}$  и  $R_{сж}$  как на ранних, так и на поздних стадиях структурообразования и твердения опытных образцов сравниваемых серий.

Так, в первом приближении оценка значений прочности  $R_{bf}$  и  $R_{сж}$  сравниваемых серий образцов в контрольные сроки после ТВО по средней величине  $\bar{R}_{bf}$  и  $\bar{R}_{сж}$  из 25 серий опытных составов позволяет сформулировать следующие положения.

Сводная ведомость изменения прочности на растяжение при изгибе  $R_{bf}$  образцов бетона на вольском портландцементе марки М500–Д20 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Прочность на растяжение при изгибе $R_{bf}$ , МПа			
	Возраст бетона $t$ , сут			
	1	28	90	6570
1в	6,4	7,16 / 1,12	7,18 / 1,00	11,73 / 1,64
2в	4,3	4,25 / 0,99	4,63 / 1,09	6,43 / 1,4
3в	6,18	7,0 / 1,13	6,69 / 0,96	11,32 / 1,62
4в	3,37	3,74 / 1,11	4,12 / 1,1	5,04 / 1,36
5в	6,68	7,74 / 1,16	8,23 / 1,06	11,32 / 1,47
6в	3,62	4,62 / 1,27	4,86 / 1,08	6,94 / 1,51
7в	6,0	7,74 / 1,29	7,79 / 1,01	11,32 / 1,47
8в	2,81	3,58 / 1,27	4,12 / 1,15	4,63 / 1,29
9в	5,9	8,8 / 1,49	7,74 / 0,88	10,8 / 1,23
10в	3,05	5,05 / 1,65	5,14 / 1,02	5,92 / 1,16
11в	5,94	8,65 / 1,45	7,20 / 0,83	12,4 / 1,44
12в	2,59	4,41 / 1,7	3,6 / 0,82	10,2 / 2,31
13в	5,94	8,19 / 1,38	6,96 / 0,85	10,29 / 1,25
14в	2,54	4,79 / 1,88	5,92 / 1,24	7,72 / 1,61
15в	5,67	8,24 / 1,45	7,72 / 0,94	10,9 / 1,33
16в	2,08	3,95 / 1,9	3,86 / 0,98	6,79 / 1,7
17в	7,12	8,55 / 1,2	9,26 / 1,08	10,8 / 1,26
18в	1,81	4,23 / 2,33	4,63 / 1,09	5,0 / 1,19
19в	4,52	6,93 / 1,53	5,56 / 0,8	11,83 / 1,71
20в	4,11	5,56 / 1,35	6,17 / 1,11	9,81 / 1,75
21в	3,92	6,62 / 1,69	7,2 / 1,09	10,8 / 1,64
22в	4,03	6,92 / 1,7	6,94 / 1,00	9,88 / 1,43
23в	3,8	5,17 / 1,36	6,02 / 1,16	9,26 / 1,78
24в	4,42	7,39 / 1,67	7,2 / 0,97	10,3 / 1,39
25в	3,92	6,92 / 1,76	7,2 / 1,04	10,4 / 1,51
$\bar{R}_{bf}$ , МПа	4,43	6,21	6,24	9,27

П р и м е ч а н и е . В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Сводная ведомость изменения прочности на растяжение при изгибе  $R_{bf}$  образцов бетона на старооскольском портландцементе марки М500–Д0 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Прочность на растяжение при изгибе $R_{bf}$ , МПа			
	Возраст бетона $t$ , сут			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
1с	6,74	8,14 / 1,21	7,63 / 0,94	10,85 / 1,33
2с	4,19	5,17 / 1,23	5,75 / 1,11	5,14 / 0,99
3с	5,61	6,86 / 1,22	7,32 / 1,07	9,82 / 1,43

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5
4с	2,43	3,13 / 1,29	4,18 / 1,34	5,12 / 1,64
5с	6,22	8,45 / 1,36	8,36 / 0,99	11,83 / 1,4
6с	3,24	5,07 / 1,56	4,7 / 0,93	6,02 / 1,19
7с	5,0	6,84 / 1,37	6,74 / 0,99	10,54 / 1,54
8с	1,58	3,12 / 1,97	4,18 / 1,34	5,4 / 1,73
9с	3,36	7,74 / 2,3	8,15 / 1,053	10,13 / 1,31
10с	2,33	3,7 / 1,59	4,18 / 1,13	5,68 / 1,54
11с	4,88	7,47 / 1,53	7,47 / 1,0	10,29 / 1,38
12с	1,31	3,76 / 2,87	3,4 / 0,9	4,12 / 1,1
13с	4,92	7,5 / 1,52	7,16 / 0,95	10,29 / 1,37
14с	2,27	3,99 / 1,75	5,33 / 1,34	6,17 / 1,55
15с	4,04	6,34 / 1,57	7,94 / 1,25	10,8 / 1,7
16с	1,6	3,4 / 2,12	3,14 / 0,92	3,6 / 1,06
17с	5,48	8,82 / 1,61	8,88 / 1,007	6,43 / 0,73
18с	1,78	3,05 / 1,71	3,71 / 1,22	5,66 / 1,86
19с	3,92	6,1 / 1,55	3,92 / 0,64	10,29 / 1,69
20с	2,94	5,25 / 1,78	6,48 / 1,23	10,03 / 1,91
21с	3,29	5,07 / 1,54	4,99 / 0,98	8,05 / 1,59
22с	3,14	5,93 / 1,89	6,61 / 1,12	10,81 / 1,82
23с	3,92	5,58 / 1,42	5,64 / 1,01	9,26 / 1,66
24с	4,31	7,23 / 1,67	6,24 / 0,86	10,27 / 1,42
25с	3,44	5,85 / 1,7	4,96 / 0,85	10,29 / 1,76
$\bar{R}_{bf}$ , МПа	3,68	5,74	5,88	8,28

Примечание. В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Таблица 5

Сводная ведомость изменения прочности на сжатие  $R_{сж}$  образцов бетона на вольском портландцементе марки М500–Д20 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа			
	Возраст бетона $t$ , сут			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
1в	48,0	60,65 / 1,26	67,3 / 1,11	88,7 / 1,46
2в	19,75	27,4 / 1,39	29,4 / 1,07	45,3 / 1,65
3в	43,9	55,8 / 1,27	62,5 / 1,12	85,0 / 1,52
4в	17,45	22,8 / 1,3	25,2 / 1,1	33,9 / 1,49
5в	47,95	61,75 / 1,29	70,0 / 1,13	91,6 / 1,48
6в	18,4	22,55 / 1,23	29,3 / 1,3	43,2 / 1,92
7в	42,35	55,9 / 1,32	60,8 / 1,09	86,6 / 1,55
8в	16,7	23,0 / 1,38	23,2 / 1,01	26,6 / 1,16
9в	39,9	62,4 / 1,56	68,3 / 1,09	98,4 / 1,58
10в	12,65	24,9 / 1,97	28,2 / 1,13	37,2 / 1,49
11в	36,6	60,4 / 1,65	67,0 / 1,11	95,0 / 1,57
12в	12,0	24,0 / 2,0	26,7 / 1,11	36,9 / 1,32
13в	30,8	60,5 / 2,0	65,7 / 1,09	102,0 / 1,69
14в	10,1	24,05 / 2,38	29,7 / 1,23	41,1 / 1,71
15в	30,15	58,0 / 1,92	68,4 / 1,18	104,4 / 1,8
16в	9,2	23,4 / 2,54	28,0 / 1,2	40,0 / 1,71

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5
17в	44,5	71,3 / 1,6	77,0 / 1,08	107,1 / 1,5
18в	10,0	20,65 / 2,06	24,0 / 1,16	35,0 / 1,69
19в	22,44	42,95 / 1,91	48,3 / 1,12	64,8 / 1,51
20в	17,7	38,1 / 2,15	45,2 / 1,19	72,0 / 1,89
21в	23,35	43,5 / 1,86	51,9 / 1,19	94,9 / 2,18
22в	20,16	41,8 / 2,07	45,7 / 1,09	74,0 / 1,77
23в	22,75	40,3 / 1,77	44,6 / 1,11	75,0 / 1,86
24в	19,95	43,7 / 2,19	47,4 / 1,08	70,3 / 1,61
25в	25,1	44,05 / 1,75	49,8 / 1,13	82,6 / 1,87
$\bar{R}_{сж}$ , МПа	25,67	42,15	47,34	71,58

Примечание. В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

Таблица 6

Сводная ведомость изменения прочности на сжатие  $R_{сж}$  образцов бетона на старооскольском портландцементе марки М500–Д0 в диапазоне времени от одних суток после ТВО до 18 лет

Серия образцов № п/п	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа			
	Возраст бетона $t$ , сут			
	1	28	90	6570
1с	48,85	65,6 / 1,34	73,2 / 1,12	92,7 / 1,41
2с	17,86	27,15 / 1,52	30,3 / 1,12	44,6 / 1,64
3с	35,9	52,95 / 1,47	59,7 / 1,13	82,2 / 1,55
4с	10,48	17,6 / 1,68	19,1 / 1,08	34,9 / 1,98
5с	39,2	62,95 / 1,6	70,6 / 1,12	98,4 / 1,56
6с	12,96	26,15 / 2,02	31,2 / 1,19	41,2 / 1,58
7с	26,5	50,05 / 1,89	59,6 / 1,19	86,2 / 1,72
8с	6,7	17,15 / 2,6	21,3 / 1,24	34,9 / 2,03
9с	30,75	50,0 / 1,63	54,5 / 1,09	88,0 / 1,76
10с	10,2	21,15 / 2,07	23,2 / 1,1	38,9 / 1,84
11с	23,4	43,8 / 1,87	52,0 / 1,19	76,8 / 1,75
12с	7,1	16,45 / 2,32	19,5 / 1,18	29,3 / 1,78
13с	30,0	50,3 / 1,68	56,9 / 1,13	88,9 / 1,77
14с	9,65	19,4 / 2,01	24,7 / 1,27	39,4 / 2,03
15с	21,73	41,75 / 1,92	50,1 / 1,2	89,4 / 2,14
16с	6,8	14,75 / 2,17	16,5 / 1,12	33,8 / 2,29
17с	41,2	64,95 / 1,58	78,0 / 1,2	93,0 / 1,43
18с	7,85	16,7 / 2,13	21,2 / 1,27	34,8 / 2,08
19с	18,1	40,3 / 2,23	37,0 / 0,92	66,4 / 1,65
20с	16,35	29,3 / 1,79	40,1 / 1,37	73,6 / 2,51
21с	17,6	33,1 / 1,88	39,5 / 1,19	76,1 / 2,03
22с	14,65	32,1 / 2,19	38,0 / 1,18	79,4 / 2,47
23с	21,45	33,9 / 1,58	36,0 / 1,06	69,3 / 2,04
24с	18,7	40,05 / 2,14	48,5 / 1,21	72,1 / 1,8
25с	16,15	33,04 / 2,05	36,1 / 1,09	77,4 / 2,34
$\bar{R}_{сж}$ , МПа	20,4	36,03	41,47	65,67

Примечание. В возрасте 28 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно односуточного возраста; в возрасте 90 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста; в возрасте 6570 суток после черты – коэффициент изменения прочности относительно 28-суточного возраста.

По характеру изменения средних значений  $R_{bif}$  и  $R_{сж}$  сравниваемых серий опытных образцов (экспериментальные данные табл. 3–6) следует отметить, что  $\bar{R}_{bif}$  после ТВО на портландцементе М500–Д0 составляла 3,68 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 4,43 МПа, что соответствовало увеличению на 20,4 %.  $\bar{R}_{сж}$  после ТВО на портландцементе М500–Д0 составляла 20,4 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 25,67 МПа, что соответствовало увеличению на 25,8 %.

В возрасте 28 суток  $\bar{R}_{bif}$  на портландцементе М500–Д0 составляла 5,74 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 6,25 МПа, что соответствовало увеличению  $\bar{R}_{bif}$  на 9,0 %.  $\bar{R}_{сж}$  в возрасте 28 суток на портландцементе М500–Д0 составляла 36,0 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 42,15 МПа, что соответствовало увеличению на 17,0 %.

В возрасте 90 суток, отражающем раннюю стадию структурообразования и твердения сравниваемых серий бетона,  $\bar{R}_{bif}$  на портландцементе М500–Д0 составляла 5,88 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 6,24 МПа, что соответствовало увеличению  $\bar{R}_{bif}$  на 6,1 %.  $\bar{R}_{сж}$  в возрасте 90 суток на портландцементе М500–Д0 составляла 41,47 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 47,34 МПа, что соответствовало увеличению на 14,2 %.

Наконец, в возрасте бетона сравниваемых серий образцов 6570 суток (18 лет), соответствующем поздней стадии структурообразования и твердения сравниваемых серий бетона,  $\bar{R}_{bif}$  на портландцементе М500–Д0 составляла 8,28 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 9,27 МПа, что соответствовало увеличению  $\bar{R}_{bif}$  на 12 %.  $\bar{R}_{сж}$  в возрасте 18 лет на портландцементе М500–Д0 составляла 65,67 МПа, а на портландцементе М500–Д20 – 71,58 МПа, что соответствовало увеличению  $\bar{R}_{сж}$  на 9,0 %.

Что касается кинетики роста средних значений  $\bar{R}_{bif}$  и  $\bar{R}_{сж}$ , представленных в табл. 7 и 8, в контрольные сроки ранней и поздней стадии структурообразования и твердения, то следует отметить, что прочность  $\bar{R}_{bif}$  после ТВО до 90 суток на портландцементе М500–Д0 росла, соответственно, на 59,8 %, а на портландцементе М500–Д20 – на 40,9 %. А с возраста бетона от 90 суток до 18 лет  $\bar{R}_{bif}$  росла на портландцементе М500–Д0 с 5,88 до 8,28 МПа, то есть на 40,8 %, а на портландцементе М500–Д20 – с 6,24 до 9,27 МПа, то есть на 48,6 %.

Т а б л и ц а 7

Интегральная и дифференциальная кинетика изменения параметра  $\bar{R}_{bif}$

при трех расходах цемента и сравнительный анализ  $\bar{R}_{bif}$

на портландцементях М500–Д20 и М500–Д0

Интегральные и дифференциальные значения $\bar{R}_{bif}$ , МПа	Возраст бетона, сут			
	1	28	90	6570
1	2	3	4	5
Кинетика изменения параметра $\bar{R}_{bif}$ на портландцементе М500–Д20, МПа / %				
$\bar{R}_{bif}^{25}$	4,43	6,25 / 41,1	6,24 / 0,0	9,27 / 48,6
$\bar{R}_{bif}^8$ Ц 481 кг/м <sup>3</sup>	6,1	7,94 / 30,2	7,44 / 0	11,26 / 51,3
$\bar{R}_{bif}^8$ Ц 289 кг/м <sup>3</sup>	3,04	4,3 / 41,4	4,53 / 5,4	6,71 / 48,1
$\bar{R}_{bif}^7$ Ц 385 кг/м <sup>3</sup>	4,1	6,5 / 58,5	6,6 / 1,5	10,3 / 56,1

О к о н ч а н и е т а б л . 7

1	2	3	4	5
Кинетика изменения параметра $\bar{R}_{bif}$ на портландцементе М500–Д0, МПа / %				
$\bar{R}_{bif}^{25}$	3,68	5,74 / 56	5,88 / 2,4	8,28 / 40,7
$\bar{R}_{bif}^8$ Ц 481 кг/м <sup>3</sup>	5,1	7,42 / 45,5	7,6 / 2,4	10,57 / 39,1
$\bar{R}_{bif}^8$ Ц 289 кг/м <sup>3</sup>	2,37	3,92 / 65,4	4,36 / 11,2	5,15 / 18,1
$\bar{R}_{bif}^7$ Ц 385 кг/м <sup>3</sup>	3,57	5,86 / 64,1	5,55 / -5,3	9,86 / 77,7
Интегральный и дифференциальный сравнительный анализ параметров $\bar{R}_{bif}$ образцов на портландцементе М500–Д20 относительно образцов на портландцементе М500–Д0, %				
$\bar{R}_{bif}^{25} Д20 / \bar{R}_{bif}^{25} Д0$	20,4	8,9	6,1	12,0
$\bar{R}_{bif}^8 Д20 / \bar{R}_{bif}^8 Д0$	19,6	7,0	-2,1	6,5
$\bar{R}_{bif}^8 Д20 / \bar{R}_{bif}^8 Д0$	28,2	9,7	3,9	30,3
$\bar{R}_{bif}^7 Д20 / \bar{R}_{bif}^7 Д0$	14,8	10,9	18,9	4,5

Т а б л и ц а 8

Интегральная и дифференциальная кинетика изменения параметра  $\bar{R}_{сж}$

при трех расходах цемента и сравнительный анализ  $\bar{R}_{сж}$

на портландцементях М500–Д20 и М500–Д0

Интегральные и дифференциальные значения $\bar{R}_{сж}$ , МПа	Возраст бетона, сут			
	1	28	90	6570
Кинетика изменения параметра $\bar{R}_{сж}$ на портландцементе М500–Д20, МПа / %				
$\bar{R}_{сж}^{25}$	25,67	42,15 / 64,2	47,34 / 12,3	71,58 / 51,2
$\bar{R}_{сж}^8$ Ц 481 кг/м <sup>3</sup>	40,0	59,4 / 48,5	66,25 / 11,5	94,0 / 41,8
$\bar{R}_{сж}^8$ Ц 289 кг/м <sup>3</sup>	14,5	24 / 65,5	27,5 / 14,6	38 / 38,2
$\bar{R}_{сж}^7$ Ц 385 кг/м <sup>3</sup>	21,6	42,1 / 94,9	47,6 / 13,1	76,2 / 60
Кинетика изменения параметра $\bar{R}_{сж}$ на портландцементе М500–Д0, МПа / %				
$\bar{R}_{сж}^{25}$	20,4	36,03 / 76,6	41,47 / 15,1	65,67 / 58,3
$\bar{R}_{сж}^8$ Ц 481 кг/м <sup>3</sup>	32,04	52,2 / 62,9	59,6 / 14,2	87,8 / 47,3
$\bar{R}_{сж}^8$ Ц 289 кг/м <sup>3</sup>	10,2	20 / 96,1	23,2 / 16	37,1 / 59,5
$\bar{R}_{сж}^7$ Ц 385 кг/м <sup>3</sup>	17,6	34,5 / 96	39,3 / 13,9	73,5 / 87
Интегральный и дифференциальный сравнительный анализ параметров $\bar{R}_{сж}$ образцов на портландцементе М500–Д20 относительно образцов на портландцементе М500–Д0, %				
$\bar{R}_{сж}^{25} Д20 / \bar{R}_{сж}^{25} Д0$	25,8	17,0	14,2	9,0
$\bar{R}_{сж}^8 Д20 / \bar{R}_{сж}^8 Д0$	24,8	11,2	11,2	7,1
$\bar{R}_{сж}^8 Д20 / \bar{R}_{сж}^8 Д0$	42,2	20,0	18,5	2,4
$\bar{R}_{сж}^7 Д20 / \bar{R}_{сж}^7 Д0$	22,7	22,0	21,1	3,7

Средняя прочность  $\bar{R}_{сж}$  после ТВО до 90 суток на портландцементе М500-Д0 росла, соответственно, с 20,4 до 41, 47 МПа, то есть на 103 %, а на портландцементе М500-Д20 – с 25,67 до 47,3 МПа, то есть на 84,3 %. А с возраста бетона от 90 суток до 18 лет  $\bar{R}_{сж}$  росла на портландцементе М500-Д0 с 41,47 до 65,67 МПа, то есть на 58,4 %, а на портландцементе М500-Д20 – с 47,34 до 71,58 МПа, то есть на 51,2 %.

В целом, анализ сравниваемых серий опытных образцов на двух видах портландцемента по характеру изменения средних значений прочности  $\bar{R}_{bf}$  и  $\bar{R}_{сж}$  в принятые сроки ранней и поздней стадии структурообразования и твердения, а также по кинетике роста средних значений  $\bar{R}_{bf}$  и  $\bar{R}_{сж}$  показал, что отдать предпочтение следует рассматриваемым характеристикам качества опытных образцов на портландцементе М500-Д20 ОАО «Вольскцемент».

В основу более строгих оценок влияния вида портландцементов на характер изменения параметров конструкционной прочности сравниваемых составов должно быть положено сравнение составов не только при одинаковом расходе цемента, но и при численно равных значениях других факторов влияния, приведенных в табл. 1 и 2.

Анализ других параметров конструкционной прочности (нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины; критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке; удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение и энергия акустической эмиссии образца на диаграмме нагружения) при изучении механического поведения опытных образцов по методике структурной механики разрушения материалов будет приведен в последующих работах.

#### Список литературы

1. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // *Строительные материалы*. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
2. Калашников, В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // *Технология бетонов*. – 2007 – № 5. – С. 8–10; 2007. – № 6. – С. 8–11; 2008. – № 1. – С. 22–26.
3. Калашников, В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения / В.И. Калашников // *Строительные материалы*. – 2012. – № 10. – С. 70–71.
4. Каприелов, С.С. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // *Бетон и железобетон*. – 2001. – № 5. – С. 11–15.
5. Каприелов, С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // *Строительные материалы*. – 2017. – № 11. – С. 4–10.
6. Макридин, Н.И. О влиянии ускоряюще-пластифицирующей добавки на характер изменения механических свойств бетона во времени / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Е.В. Королев, О.В. Меньшова // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2004. – № 5. – С. 43–47.
7. Макридин, Н.И. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова // *Строительные материалы*. – 2007. – № 3. – С. 26–29.
8. Макридин, Н.И. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 3. Идентификация процесса разрушения / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, И.А. Суров // *Строительные материалы*. – 2012. – № 7. – С. 83–86.
9. Максимова, И.Н. Сравнительный анализ влияния суперпластификатора на процесс и параметры разрушения цементного камня по методу акустической эмиссии / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин, Ю.В. Полубарова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2016. – №2 (27). – С. 4–9.

10. Несветаев, Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах / Г.В. Несветаев // *Строительные материалы*. – 2006. – № 10. – С. 23–25.
11. Тараканов, О.В. Влияние комплексных минеральных добавок на прочность и состав гидратации цементных материалов / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – № 4 (45). – С. 46–52.
12. Ушеров-Маршак, А.В. Взгляд в будущее бетона / А.В. Ушеров-Маршак // *Строительные материалы*. – 2014. – № 3. – С. 4–5.
13. Рекомендации по применению ускоряюще-пластифицирующей добавки ПДО-М в производстве сборного и монолитного железобетона / В.И. Калашников, И.И. Романенко, А.С. Мишин, Н.И. Макридин [и др.]. – М.-Пенза: Пензенский ИСИ: НИИЖБ Госстроя СССР, 1989. – 16 с.

#### References

1. Bazhenov, Yu.M. Construction of modern concrete structures: defining principles and technological platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // *Building materials*. – 2014. – No. 3. – P. 6–14.
2. Kalashnikov, V.I. Through rational rheology into the future of concretes / V.I. Kalashnikov // *Tekhnologiya concretes*. – 2007. – No. 5. – P. 8–10; 2007. – No. 6. – P. 8–11; 2008. – No. 1. – P. 22–26.
3. Kalashnikov, V.I. What is a new generation of powder-activated concrete / V.I. Kalashnikov // *Building materials*. – 2012. – No. 10. – P. 70–71.
4. Kapriyelov, S.S. Influence of the composition of organomineral modifiers of concrete of the MB series on their effectiveness / S.S. Kapriyelov, A.V. Sheinfeld // *Concrete and reinforced concrete*. – 2001. – No. 5. – P. 11–15.
5. Kapriyelov, S.S. Cements and additives for the production of high-strength concrete / S.S. Kapriyelov, A.V. Sheinfeld // *Stroitelnye materialy*. – 2017. – No. 11. – P. 4–10.
6. Makridin, N.I. On the influence of the accelerating-plasticizing additive on the nature of the change in the mechanical properties of concrete in time / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, E.V. Korolev, O.V. Menshova // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2004. – No. 5. – P. 43–47.
7. Makridin, N.I. Method of acoustic emission in construction materials science / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova // *Building materials*. – 2007. – No. 3. – P. 26–29.
8. Makridin, N.I. Long-term strength of the modified cement stone structure. Part 3. Identification of the process of destruction / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, I.A. Surov // *Building materials*. – 2012. – No. 7. – P. 83–86.
9. Maksimova, I.N. Comparative analysis of the effect of superplasticizer on the process and parameters of destruction of cement stone by the method of acoustic emission / I.N. Maksimova, V.T. Erofeev, N.I. Makridin, Yu.V. Polubarova // *Regional architecture and engineering*. – 2016. – №2 (27). – P. 4–9.
10. Nesvetaev, G.V. The effectiveness of the use of superplasticizers in concrete // *Stroitelnye materialy*. – 2006. – No. 10. – P. 23–25.
11. Tarakanov, O.V. Influence of complex mineral additives on strength and composition of hydration of cement materials / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – № 4 (45). – P. 46–52.
12. Usharov-Marshak, A.V. A look into the future of concrete / A.V. Usharov-Marshak // *Stroitelnye materialy*. – 2014. – No. 3. – P. 4–5.
13. Recommendations for the use of the accelerating-plasticizing additive PDO-M in the production of precast and monolithic reinforced concrete / V.I. Kalashnikov, I.I. Romanenko, A.S. Mishin, N.I. Makridin [et al.]. – M.-Penza: Penza ISI: NIIZhB Gosstroy of the USSR, 1989. – 16 p.

УДК 519.7:378.1

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  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»  
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  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Danilov Alexander Maksimovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, Head of the  
department «Mathematics and Mathematical  
Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## ИЗ ОПЫТА СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

Предлагаются системный подход к исследованию проблем идентификации, фундаментальные исследования математических и вычислительных проблем управления свойствами материалов, оптимизация структуры и свойств материала по параметрам кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик по разработанному функционалу качества. Отмечается, что существует риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации: нечеткость и искажение содержательного смысла конструкций модели относительно их математической интерпретации. Для качественного анализа материалов как сложных систем и определения структуры и свойств осуществляется когнитивное моделирование. Приводятся результаты аналитического конструирования композиционных материалов.

*Ключевые слова:* сложные системы, композиты, синтез, системный подход, когнитивное моделирование, идентификация, структура, свойства

## FROM THE EXPERIENCE OF SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

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

A systems approach to the study of identification problems, fundamental research of mathematical and computational problems of controlling the properties of materials, optimization of the structure and properties of a material according to the parameters of kinetic processes of formation its physical and mechanical characteristics according to the developed quality functional is proposed. It is noted that there is a risk of inadequate application of the formalized model to a specific problem situation: fuzziness and distortion of the meaning of the model's constructions regarding their mathematical interpretation. For the qualitative analysis of materials as complex systems and the determination of the structure and properties, cognitive modeling is carried out. The results of the analytical design of composite materials are presented.

*Keywords:* complex systems, composites, synthesis, systems approach, cognitive modeling, identification, structure, properties

## 1. Системный подход к исследованию проблем идентификации

При разработке методов синтеза строительных материалов 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. Существует актуальная потребность создания наукоемких методологий для начальных этапов поиска решений трудных (существенно нестандартных) практических задач, содержащих трудно формализуемые и высокие требования к качеству управления (оценивания, прогнозирования). Это в полной мере относится к строительному материаловедению.

При решении задач идентификации (включает и процесс человеческого выбора) для описания реальности многое зависит от априорной нацеленности исследователя на применение определенного математического аппарата, от степени его разработанности и часто подсказывается математической интуицией. 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 выбору и оценке качества «наилучшей» структуры (заданное семейство математических уравнений). Содержанием структурной идентификации в основном является математическое моделирование и исследование локальных фрагментов без учета их реального контекста.

Наибольшая ответственность возникает при процедуре принятия решений (объекты плохо формализуемы; сложная иерархия задач; задачи оперативного управления являются лишь фрагментами глобальной задачи управления качеством и требуют отслеживания частных критериев и т.д.). Большинство из этих задач можно решить лишь на междисциплинарном уровне (естественно желательно каждый фрагмент локальной или глобальной задачи – в пределах одной дисциплины), что требует подготовки соответствующего интеллектуального потенциала внутри различных дисциплинарных научных школ. Нами на основе классификации наиболее распространенных видов кинетических процессов строилась их обобщенная модель. Каждый из рассматриваемых кинетических процессов – частный случай обобщенной модели. Алгоритмы определения параметров моделей составлялись исходя из характерных точек кинетических процессов. Параметрическая идентификация кинетических процессов сводилась к определению параметров *обобщенной модели*. При решении отдельных задач *целевая функция* формировалась с учетом как реакции системы на пробные воздействия, так и синхронных измерений характеристик системы и управляющих воздействий в процессе нормальной эксплуатации. Определялись перекрестные связи (синергетика) между свойствами материала. На их основе уточнялись структурные и математические модели систем и подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций). *Оптимизация структуры и свойств* материала по параметрам кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик осуществлялась на основе специально разработанного *функционала качества*. Фактором риска является недопонимание математического смысла конструкций специалистами проблемной области (риск неадекватного применения формализованной модели к конкретной проблемной ситуации): *нечеткость и искажение содержательного смысла конструкций модели относительно их математической интерпретации порождает риск недостоверной оценки силы влияния факторов, особенно при недостатке данных для такой оценки*. Считается, фактор представлен в нормальной форме, если он может быть интерпретирован естественным образом, и определяется как переменная, принимающая значение на определенной измерительной или оценочной шкале (с вербальными значениями: «высокий», «низкий»). С лингвистической точки зрения нормальность фактора позволяет возможность естественного использования

словесных контекстов: «больше – меньше», «рост – снижение» и др. Отметим, что нередко возникает затруднение даже при выборе аналогичных по смыслу контекстов, например «хуже – лучше». Требуется *когнитивная ясность* понятия как переменной требуемого типа: одни и те же *каузальные (причинно-следственные) связи* при моделировании могут быть в когнитивной карте представлены с использованием различных понятий. *Предполагается универсальным принцип транзитивности каузальных понятий*: из *A* является причиной *B*, а *B* – причиной *C* следует, что *A* является причиной *C*. К сожалению, часто принцип транзитивности не выполняется; и имеет место *ложная транзитивность*: *A* не является причиной *C*.

Философские проблемы отличаются от научных тем, что они являются *центрами проблематизаций* (по сути, и не должны быть разрешены); *отделение друг от друга философии и математики привело к неразрешимости ряда теоретических и прикладных задач синтеза систем*. Перспективное направление системных исследований связано с решением в той или иной форме проблемы «черного ящика»: сначала производится замена физических процессов в некотором блоке-преобразователе множеством передаточных функций, согласующих параметры входов и выходов системы (выявляются типовые физические процессы, позволяющие *онтологизировать* передаточные функции и придать физическое соответствие переменным в уравнении). Для замены «черного ящика» «серым» используются *модели гомеостатического типа*, обладающие определенной универсальностью и возможностью физического толкования процессов.

Одним из междисциплинарных подходов является *синергетика (синергетический эффект – действие превышает действие, оказываемое каждым компонентом в отдельности)* с анализом бифуркаций (точки пространства, в которых происходит выбор и где сложную систему можно направить по различным траекториям). Оценка сложности системы может производиться по-разному. В частности, по А.Н. Колмогорову сложность объекта определяется, как минимальный размер количества информации, задающей этот объект; принятыми *принципиальными гипотезами о механизмах функционирования объекта определяется адекватность модели*. В последнее время все чаще при моделировании используется *метод погружения*, в котором используются модели простых вспомогательных систем, мажорирующих или минорирующих поведение изучаемой системы.

Эффективность и перспективность использования системного подхода подтвердилась и при создании сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации [1..3].

## 2. Качественный анализ материалов как систем

Разработка композитов начиналась с составления *когнитивной карты*: определялись причинно-следственные связи. Системный подход в связи с междисциплинарностью исследований в материаловедении ранее практически не использовался («...когда внешней средой наука не востребована, то по этому свойству система изолирована или закрыта, и только тогда, когда появится потребитель во внешней среде, система откроется»).

Управление технологией изготовления производится в соответствии с полиструктурной теорией (раздельное формирование отдельных структур композитов на мало- или несомещающихся компонентах). *Оптимизация каждого структурного уровня осуществляется на основе выделенных критериев*. На каждом последующем структурном уровне (новый материал) оптимизированная рецептура и технология предыдущего уровня уточняются. Последовательное совмещение уровней (от микро- до макро-структуры) осуществляется на основе критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (продукта технологии). Нами использовалась аналогия структур систем: *изоморфизм и гомоморфизм*. Построение орграфа позволило установить элементарные рецептурные факторы (количество, удельная поверхность, химический состав и др.) для управления технологией изготовления материала [4..6].

## 3. Структура и свойства материалов

Исходя из применения определенного математического аппарата и в зависимости от степени его разработанности осуществлялся предварительный анализ априорной информации. Основные усилия направлялись на *структуризацию и абсолютную формализацию*. Предполагалось, что *Человек имеет безусловный приоритет перед результатами анализа*. Использовались методы *векторной оптимизации: целевая функция* определялась по желаемым видам кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик композитов; учитывалась возможность установления связи между строением композита и изменениями макроскопических характеристик. С учетом сложности установления влияния рецептурно-технологических параметров на характеристики материалов разрабатывалась *специальная методика управления выходными характеристиками материала*, определялись перекрестные связи (*синергетика*) между свойствами материала; уточнялись математические модели подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций). При управлении качеством оказалось эффективным *использование принципа и диаграмм Парето* (как оказалось, для эпоксидных композиционных материалов для защиты от радиации прочность и плотность определяются в основном степенью наполнения и видом модификатора). Использовался и *итеративный способ улучшения качества* материала на основе последовательного построения на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето.

## 4. Аналитические методы при синтезе материалов

На основе опыта разработки композитов возник новый подход с методологическими принципами создания материалов, основанный на использовании методов системного анализа и моделирования кинетических процессов. Сначала материал рассматривался как слабоструктурированная многоцелевая система. При междисциплинарных исследованиях использовалась неполная, нечеткая и даже противоречивая информация. По когнитивной карте (в том числе коллективной) строились иерархические структуры критериев качества и собственно системы, что позволяло рассматривать систему уже как структурированную; широко использовались методы ранговой корреляции (в частности, исследовались деформативные свойства (учитывались 14 показателей) и связи между ними для 10 видов эпоксидных композитов) [7]. Было показано отсутствие необходимости определения некоторых свойств (предела прочности при сжатии, твердость): наличие существенных связей между ними; *отсутствие согласованности между всей совокупностью показателей при наличии парной согласованности между отдельными из них* (выборочное значение коэффициента конкордации).

Оптимизация рецептурно-технологических параметров и управления качеством материала производилась по результатам многокритериальной оптимизации (предварительная минимизация размерности критериального пространства). При противоречивых критериях многоцелевая оптимизация осуществлялась с использованием метода последовательных уступок; рассматривались методы скаляризации критериев на основе результатов решения однокритериальных задач (как контрольных показателей) [8]. Эффективность и перспективность использования предлагаемых методов подтвердились при многокритериальном синтезе радиационно-защитных материалов.

### Выводы

1. Предложен системный подход к исследованию проблем идентификации при разработке композиционных материалов.
2. Осуществлено когнитивное моделирование для качественного анализа материалов как систем, определены их структура и свойства.
3. Проанализированы результаты применения аналитических методов синтеза композиционных материалов.

## Список литературы

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
2. Гарькина, И.А. Методы системного анализа в проектировании композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 63–68.
3. Будылина, Е.А. Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 41–45.
4. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032005.
5. Ибрагимов, Р.А. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 1. – С. 35–41.
6. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
7. Бормотов, А.Н. Оптимизация структуры эпоксидных композитов повышенной плотности / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 1999. – № 3. – С. 123.
8. Гарькина, И.А. Преодоление неопределенности целей в задачах многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов // Строительные материалы. – 2006. – № 9. – С. 104–105.

## References

1. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – №3. – P. 143–159.
2. Garkina, I.A. Systems analysis methods in composite design / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – № 1 (42). – P. 63–68.
3. Budylyna, E.A. Conceptual approaches to system design of composite materials / E.A. Budylyna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2021. – № 1 (46). – P. 41–45.
4. Garkina, I.A. Composite materials: identification, control, synthesis / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 032005.
5. Ibragimov, R.A. Strength of composites based on modified Portland cement activated in a vortex layer apparatus / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev // Industrial and civil engineering. – 2021. – № 1. – P. 35–41.
6. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61.
7. Bormotov, A.N. Optimization of the structure of epoxy composites of increased density / A.N. Bormotov, A.P. Proshin // Bulletin of the Volga regional branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. – 1999. – № 3. – P. 123.
8. Garkina, I.A. Overcoming the ambiguity of goals in the problems of multicriteria optimization on the example of the development of superheavy concrete for protection from radiation / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // Building materials. – 2006. – № 9. – P. 104–105.

УДК 691.3-404:666.971.1

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

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

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

**Юрова Варвара Сергеевна**,  
аспирант  
E-mail: varya\_bel@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

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

**Moskvin Roman Nikolaevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Operation of Automobile Transport»  
E-mail: moskva\_in@mail.ru

**Yurova Varvara Sergeevna**,  
Postgraduate student  
E-mail: varya\_bel@mail.ru

## ПРИРОДА МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ПОДВИЖНОСТЬ БЕТОННОЙ СМЕСИ

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

Изучены влияние природы высокодисперсных порошков из горных пород, являющихся микронаполнителями современных бетонных смесей, на основные реотехнологические характеристики бетонов, а также свойства порошково-активированных бетонных смесей различной подвижности. Выявлено, что степень растекания наполненных бетонных смесей определенным образом зависит от генезиса горных пород, выбранных в качестве минеральной каменной муки, а особое влияние на реологическую активность супер- и гиперпластифицирующих добавок оказывает заряд поверхности частиц каменной муки. Показано, что поликарбоксиланые суперпластификаторы проявляют большую эффективность в цементно-минеральных суспензиях с положительно заряженными частицами молотых горных пород. Оценено влияние химического и минералогического состава различных цементов на степень растекания бетонных смесей. Выявлено, что повышенное количественное содержание трехкальциевого алюмината  $C_3A$  и оксида серы  $SO_3$  препятствует адсорбции поликарбоксилатов и негативно влияет на пластификацию бетонной смеси.

*Ключевые слова:* минеральные наполнители, тонкомолотые горные породы, подвижность, современные бетонные смеси, реологически-активные добавки

## THE NATURE OF MINERAL FILLERS AND MOBILITY OF CONCRETE MIXTURE

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

The article is devoted to the study of the influence of the nature of highly dispersed powders from rocks (which are microfillers of modern concrete mixtures) on the main rheotechnological characteristics of concretes. The properties of powder-activated concrete mixtures of various mobility have been studied. It is revealed that the degree of spreading of filled concrete mixtures in a certain way depends on the genesis of rocks selected as mineral stone flour. A special effect on the rheological activity of super- and hyperplasticizing additives is exerted by the surface charge of the stone flour particles. It has been shown that polycarboxylated superplasticizers are more effective in cement-mineral suspensions with positively charged particles of grounded rocks. The influence of the chemical and mineralogical composition of various cements on the degree of concrete mixtures spreading is estimated. The increased quantitative content of tricalcium aluminate  $C_3A$  and sulfur

oxide  $SO_3$  prevents the adsorption of polycarboxylates and negatively affects the plasticization of the concrete mixture.

*Keywords: mineral fillers, finely grounded rocks, mobility, modern concrete mixes, rheologically active additives*

Подвижность бетонной смеси является одним из важнейших показателей, определяющих ее способность растекаться и уплотняться в опалубке под действием собственного веса. Для производства строительных работ и обеспечения необходимого качества бетона в конструкциях необходимо, чтобы подвижность бетонной смеси соответствовала всем нормам и требованиям ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия».

Известно, что подвижность бетонной смеси зависит не только от объема введенной воды затворения, но и от количества и природы нано- и микрометрических наполнителей.

В соответствии с разработанной в [1] классификацией сухих компонентов в бетонах нового поколения должны присутствовать компоненты всех масштабных уровней:

- цемент и каменная мука, в основном микрометрического уровня с размером частиц 1–100 мкм;
- кремнеземы среднего нанометрического масштабного уровня (осажденный и пирогенный кремнезем) с размером частиц 10–100 нм;
- кремнеземы и алюмосиликаты верхнего наномасштабного уровня (микрокремнезем, дегидратированный каолин) с размером частиц 100–1000 нм;
- тонкий песок с размером частиц 0,1–0,5 мм;
- песок-заполнитель макрометрического уровня;
- крупный заполнитель макрометрического уровня фр. 5,0–20,0 мм.

Ранее было установлено [2, 3], что порошково-активированные песчаные или щебеночные бетоны могут быть изготовлены и без реакционно-активной добавки (микрокремнезема и т.п.), если не требуется большая прочность. При этом большой объем цементно-минерально-водной суспензии, определяющей течение бетонных смесей, может быть получен на реологически-активных наполнителях.

Многие проведенные исследования [4–7] рекомендовали при проектировании составов бетонов в качестве тонкодисперсных минеральных добавок использовать кварцевые пески, как наиболее распространенные во многих регионах России. Кроме кварцевых песков, распространены месторождения осадочных пород (известняки, доломитизированные известняки, доломиты, песчаники), поэтому использование их в качестве дисперсных наполнителей является весьма актуальным. Образующиеся при дроблении щебня отсева размалываются, и каменная мука используется в качестве дисперсного наполнителя асфальтобетонов, что является чрезвычайно важным с позиции энерго- и материалосбережения.

Повышения подвижности бетонной смеси при сохранении прочностных характеристик невозможно добиться без применения супер- и гиперпластифицирующих добавок [8], как и достичь значительного реологического эффекта в бетонах старого поколения только введением СП. Для получения проектируемой подвижности бетонной смеси необходимо наличие так называемой реологической матрицы.

Практически все суперпластификаторы [9] показывают большую эффективность в суспензиях на ряде минеральных порошков или на смеси их с цементом, чем на чистом вяжущем: цемент является нестабильной системой, гидратирующейся в воде, образующей в процессе гидратации суперколлоидные частицы сразу же после контакта с водой и, в конечном итоге, быстро загустевающей. А как известно, коллоидные частицы и гели в воде трудно диспергировать суперпластификаторами [10].

С целью определения влияния природы минеральных микронаполнителей на подвижность бетонных смесей нового поколения были исследованы составы реакционно-порошковых суспензионных бетонов (см. таблицу). В качестве тонкодисперсного минерального компонента – каменной муки – были использованы высокопрочные тонкомолотые горные породы (гранит, доломит, высококальциевый изве-

стняк, базальт, диабаз, кварц), а также осадочные породы Пензенской области (песчаник и доломитизированный известняк). Удельная поверхность всех тонкодисперсных компонентов составляла  $S_{уд}=5-9,5$  тыс.  $см^2/г$ . В качестве пуццоланической добавки использовались микрокремнезем и микробиокремнезем (обоженный тонкомолотый диатомит). Соотношение компонентов Ц:КМ:ПТ:ПД (ПД – пуццоланическая добавка) соответствовало оптимальному соотношению: 1:0,5:1,5:0,1. Количество воды подбиралось таким образом, чтобы получить относительную степень растекания смеси, равную  $\Gamma=8-11$  (расплыв конуса Хегерманна 30–34 см). В качестве гиперпластифицирующей добавки использовался Melflux 5581F в количестве 0,8 % от массы цемента.

#### Прочностные и реотехнологические показатели реакционно-порошковых суспензионных бетонных смесей

№ состава	Вид цемента, расход на 1 м <sup>3</sup> , кг	Вид каменной муки	Вид пуццоланической добавки	В/Т	Г	$\rho_{вл.}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}^{28}$ , МПа
1	ЦД, 664	Кварц	МК	0,123	8,0	2296	113,9
2	ЦД, 655	Известняк	МК	0,116	8,0	2302	110,5
3	ЦД, 670	Доломит	МК	0,117	10,6	2335	105,4
4	ЦД, 680	Доломит	МК	0,106	10,2	2324	110,5
5	ЦД, 683	Доломит	МК	0,099	7,4	2328	113,1
6	ЦК, 670	Доломит	МК	0,106	6,8	2304	102,9
7	ЦК, 678	Доломит	МК	0,106	6,3	2307	109,7
8	ЦД, 681	Кварц	БК	0,124	11,6	2289	103,7
9	ЦД, 592	Песчаник	МК	0,154	8,0	2095	85,0
10	ЦД, 669	Известняк	МК	0,123	9,2	2318	115,6
11	ЦД, 657	Песчаник	МК	0,123	8,0	2234	103,7
12	ЦД, 660	Диабаз	МК	0,123	8,6	2305	107,1
13	ЦЩ, 664	Кварц	БК	0,128	9,2	2253	105,4
14	ЦЩ, 690	Гранит	МК	0,115	9,2	2302	108,8
15	ЦД, 697	Известняк	–	0,115	9,9	2331	112,2

Примечание: ЦД – цемент белый СЕМ I 52,5 (AlborgWeit, Дания); ЦЩ – цемент белый ПЦ500 Д0 ОАО «Щуровский цемент»; ЦК – цемент ПЦ500 Д0 (ООО «Красноярский цемент»); МК – микрокремнезем марки МК-85; БК – микробиокремнезем (термоактивированный диатомит).

В качестве контрольного состава был принят состав бетонной смеси на основе белого цемента СЕМ 52,5R (Дания), пылевидного кварца, липецкого микрокремнезема и ГП Melflux 5581F (см. таблицу, состав №1). Расплыв конуса Хегерманна у контрольной суспензии составил 30 см ( $\Gamma=8$ ) при В/Т=0,123; объемное содержание водно-дисперсной фазы –  $C_{вд}^V=62\%$ ; плотность бетонной смеси – 2296 г/м<sup>3</sup>.

Бетонные смеси с каменной мукой из карбонатных пород обладают высокой реологической активностью в сравнении с бетонами на основе пылевидного кварца, что объясняется лучшей адсорбцией молекул ГП на поверхности частиц известняка и доломита.

Одинаковую степень растекания по сравнению с контрольным составом при уменьшении В/Т на 6 % показала бетонная смесь на основе известняковой каменной муки (состав №2). При этом отмечалось незначительное (на 3 %) снижение прочности при сжатии на 28-е сутки твердения.

Исследования показали, что наилучшей реологической активностью обладал доломит. Так, при В/Т=0,117 (состав №3) относительная степень растекания  $\Gamma$  составила 10,56 (расплыв конуса Хегерманна 34 см), при В/Т=0,106  $\Gamma=9,9$  (расплыв конуса Хегерманна 33 см) (состав №4) и при В/Т=0,099  $\Gamma=8$  (расплыв конуса Хегерманна 30 см) (состав №5).

Как видно из таблицы (состав №11), реотехнологические показатели суспензии, изготовленной с использованием кварцевого песчаника карьеров Пензенской области, оказались аналогичными контрольному составу. Это объясняется тем, что по своему происхождению песчаники – это сцементированные зерна песка, которые в тонкомолотом состоянии имеют отрицательно заряженную поверхность. В присутствии  $\text{Ca}^{2+}$  поверхность перезаряжается, и это способствует адсорбции на ней отрицательно заряженных функциональных групп поликарбоксилатных ГП, благодаря чему на поверхности раздела фаз создается гидрофобный эффект для свободной воды и стерический эффект – для соседних частиц цемента или наполнителя.

В то же время для получения сопоставимой подвижности при использовании глауконитового песчаника месторождения Пензенской области потребовалось увеличить В/Т отношение на 14 % по сравнению с контрольным (состав №9). Это вызвано высокой капиллярной пористостью данного песчаника, водопоглощение которого, по нашим исследованиям, составило 7–12 %. Кроме того, низкая плотность песчаника повлияла и на снижение плотности бетонной смеси (2,095 г/см<sup>3</sup>).

Бетонные смеси, полученные на основе каменной муки из магматических горных пород – гранита и диабазы (составы №14 и №12), имели относительную степень растекания  $\Gamma$  9,2 и 8,6 соответственно при В/Т 0,115 и 0,123. Незначительное увеличение реотехнологических показателей обусловлено неоднородной структурой данных пород, на частицах которой образуются как положительно, так и отрицательно заряженные участки.

С целью оценки влияния вида пуццоланической добавки на реотехнологические свойства реакционно-порошковых суспензионных бетонных смесей были изготовлены бетоны с добавкой микрокремнезема и микробиокремнезема (термоактивированный диатомит) в количестве 10 % от массы цемента.

Было установлено, что реологическая активность СП в водно-дисперсно-тонкозернистой суспензии в присутствии микробиокремнезема достаточно высокая – расплыв конуса Хегерманна составил 35 см (состав №8) при В/Т=0,124. Таким образом, использование термоактивированного диатомита повышает реотехнологические показатели в сравнении с микрокремнеземом (контрольный состав): показатель  $\Gamma$  увеличился с 8 до 11,6.

При замене импортного белого цемента марки СЕМ I 52,5 (Дания) в составе №8 на отечественный производства Щуровского цементного завода (состав №13) произошло снижение реотехнологического показателя расплыва конуса Хегерманна с 35,5 см до 32 см, несмотря на увеличение содержания воды на 3,2 %.

Было установлено, что замена микрокремнезема термоактивированным диатомитом повышает реологическую активность СП в бетонной смеси при незначительном снижении прочности (составы №13 и №1).

Исключение из состава №10 добавки микрокремнезема (состав №15) потребовало увеличения расхода цемента на 4 %, уменьшения содержания воды на 9 % для сохранения той же текучести. При этом прочность бетонных образцов практически не изменилась. При принятых соотношениях компонентов всех изготовленных и исследованных реакционно-порошковых бетонов объемная концентрация дисперсно-водной фазы находилась в пределах  $C_{\text{ВД}}^V = 60\text{--}62\%$ .

Следует отметить результаты сравнительного анализа составов бетонных смесей, изготовленных на основе белого датского цемента AlborgWeit (состав №4) и красноярского цемента (составы №6 и №7). Рецептура этих бетонных смесей предусматривает одинаковое водотвердое отношение при одном и том же микронаполнителе – доломитовой каменной муке.

Повышенное содержание в красноярском цементе трехкальциевого алюмината  $\text{C}_3\text{A}$  (7–8 %) и оксида серы  $\text{SO}_3$  (2,79–2,94 %) в сравнении с содержанием данных компонентов в белом цементе (4–5 % и 1,8–2,3 % соответственно) определенным образом влияет на реологические свойства бетонной смеси. Сочетание  $\text{C}_3\text{A}$  и сильно заряженных ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  цемента препятствует адсорбции поликарбоксилатов и, таким образом, негативно влияет на эффект диспергирования (пластификации) смеси. Этот

эффект и наблюдается в случае замены цемента AlborgWeit на цемент ООО «Красноярский цемент».

Представленные выше суспензионные порошковые бетонные смеси являются реологической матрицей для порошково-активированных песчаных и щебеночных бетонов нового поколения, общей характеристикой которых является значительное содержание растворной части с большой долей водно-дисперсной и водно-дисперсно-тонкозернистой составляющей вне зависимости от подвижности бетонной смеси. Эксперименты показывают, что отсеы камнедробления, имеющие различный химический состав и физические свойства, являются хорошей сырьевой базой для изготовления компонентов бетонов нового поколения.

Выводы:

1. Высокодисперсные порошки из горных пород, являющиеся наполнителями в бетонных смесях нового поколения, существенным образом влияют на реотехнологические показатели порошково-активированных бетонных смесей, уменьшая или увеличивая подвижность суспензий.

2. Природа и количество микронаполнителя позволяют варьировать необходимые реотехнологические и физико-механические свойства бетона, что, в свою очередь, дает возможность разработать оптимальные составы самоуплотняющихся бетонных смесей с реологически-активными добавками на основе дисперсных наполнителей из тонкомолотых горных пород.

#### Список литературы

1. Калашников, В.И. Бетоны: макро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов / В.И. Калашников // Сб. докладов конференции «Дни современного бетона. От теории к практике». – Запорожье, 2012. – С. 38–50.
2. Белякова, Е.А. Порошковые и порошково-активированные бетоны с использованием горных пород и зол ТЭЦ: дис ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Е.А. Белякова. – Пенза, 2013. – 190 с.
3. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of the control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Procedia Engineering. – 2016. – P. 1631–1635.
4. Ананьев, С.В. Состав топологическая структура и реотехнологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / С.В. Ананьев. – Пенза, 2011. – 148 с.
5. Гуляева, Е.В. Реотехнологические характеристики пластифицированных цементно-минеральных дисперсных суспензий и бетонных смесей для производства эффективных бетонов. Дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Е.В. Гуляева. – Пенза, 2012. – 178 с.
6. Калашников, В.И. Бетоны: макро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов / В.И. Калашников // Сб. докладов конференции «Дни современного бетона. От теории к практике». – Запорожье, 2012. – С. 38–50.
7. Belyakova, E. High-quality cement-mineral suspensions using stone crushing waste / E. Belyakova, R. Moskvina, V. Yurova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 992 MSF. – P. 124–129.
8. Tarakanov, O.V. Complex organomineral additives with hardening accelerator / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, V.S. Yurova // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 929–935.
9. Тараканов, О.В. Влияние суперпластификаторов на пластичность цементных и минеральных паст / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова // Технологии бетонов. – 2013. – № 2 (79). – С. 18–20.
10. Калашников, В.И. Применение водных суспензий природных пуццоланических добавок в производстве бетонов / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Р.Н. Моск-

## References

1. Kalashnikov, V.I. Concrete: macro-, nano- and picoscale raw materials. Real nanotechnology of concrete / V.I. Kalashnikov // Sb. reports of the conference "Days of modern concrete. From theory to practice". – Zaporozhye, 2012. – P. 38–50.
2. Belyakova, E.A. Powder and powder-activated concretes using rocks and ash from thermal power plants: dis ... Cand. tech. Sciences: 05.23.05 / E.A. Belyakova. – Penza, 2013. – 190 p.
3. Kalashnikov, V.I. Selecting the type of the control setting composite cement-ash binder / V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, R.N. Moskvina // Procedia Engineering. – 2016. – P. 1631–1635.
4. Ananiev, S.V. Composition, topological structure and rheological properties of rheological matrices for the production of new generation concretes: dis ... Cand. tech. Sciences: 05.23.05 / S.V. Ananiev. – Penza, 2011. – 148 p.
5. Gulyaeva, E.V. Rheotechnological characteristics of plasticized cement-mineral dispersed suspensions and concrete mixtures for the production of effective concrete: dis. Cand. tech. Sciences: 05.23.05 / E.V. Gulyaeva. – Penza, 2012. – 178 p.
6. Kalashnikov, V.I. Concrete: macro-, nano- and picoscale raw materials. Real nanotechnology of concrete / V.I. Kalashnikov // Sb. reports of the conference "Days of modern concrete. From theory to practice". – Zaporozhye, 2012. – P. 38–50.
7. Belyakova, E. High-quality cement-mineral suspensions using stone crushing waste / E. Belyakova, R. Moskvina, V. Yurova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 992 MSF. – P. 124–129.
8. Tarakanov, O.V. Complex organomineral additives with hardening accelerator / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, V.S. Yurova // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 929–935.
9. Tarakanov, O.V. Influence of superplasticizers on the plasticity of cement and mineral pastes / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova // Concrete Technologies. – 2013. – No. 2 (79). – P. 18–20.
10. Kalashnikov, V.I. The use of aqueous suspensions of natural pozzolanic additives in the production of concrete / V.I. Kalashnikov, O.V. Tarakanov, R.N. Moskvina, M.N. Moroz, E.A. Belyakova, V.S. Belyakova, R.I. Spiridonov // Systems. Methods. Technologies. – 2013. – No.1 (17). – P. 103–107.

УДК 691.005.5

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

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

**Зайцева Мария Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»

*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

**Zaitseva Maria Vladimirovna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
Management and Construction Technologies»

## ИЗВЕСТКОВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ И ОТДЕЛКИ СТЕН ЗДАНИЙ

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведены сведения о влиянии полисиликатного раствора, полученного смешением жидкого стекла с золь кремниевой кислоты, на структурообразование известковых составов. Установлено, что введение полисиликатного раствора способствует ускорению набора пластической прочности. Для сравнения в качестве добавки применяли жидкое стекло, золь кремниевой кислоты. Установлен синергетический эффект влияния полисиликатного раствора на структурообразование известковых отделочных составов, проявляющийся в ускорении набора пластической прочности по сравнению с золь кремниевой кислоты и жидким стеклом.

*Ключевые слова: известь, полисиликатный раствор, золь кремниевой кислоты, жидкое стекло, пластическая прочность, синергетический эффект*

## LIME COMPOUNDS FOR RESTORATION AND DECORATION OF BUILDING WALLS

V.I. Loganina, M.V. Zaitseva

Some information on the effect of a polysilicate solution obtained by mixing liquid glass with a silicic acid sol on the structure formation of lime compositions is presented. It is found that the introduction of a polysilicate solution accelerates the development of plastic strength. For comparison, liquid glass and a sol of silicic acid have been used as an additive. The synergistic effect of the influence of the polysilicate solution on the structure formation of lime finishing compositions has been established, which manifests itself in acceleration of set plastic strength in comparison with silica sol and water glass.

*Keywords: lime, polysilicate solution, silicic acid sol, liquid glass, plastic strength, synergistic effect*

Сохранение архитектурного наследия прошлого, санация зданий в районах исторической застройки требуют применения специализированных отделочных материалов. Традиционными материалами для окрашивания стен зданий были известковые составы. Однако в настоящее время реставрация исторических зданий вызывает определенные трудности, связанные с несовместимостью известковой штукатурки с современными отделочными материалами. Современные краски малоприспособны для окрашивания зданий, оштукатуренных известковыми составами. Лакокрасочные пленки, образуемые органическими красками на слабых подложках, быстро растрескиваются и отслаиваются, нередко вместе с мелкими фрагментами верхнего слоя известковой штукатурки.

На сегодняшний день на рынке отделочных материалов имеется большое количество зарубежных известковых составов или отечественных с применением импортных добавок. Популярными известковыми красками для реставрации объектов культурного наследия являются «Холви», «Кальцемур», «Силакра-известковая», «Антик 1» и «Антик 2» и др., содержащие в своем составе целевые добавки, производителями которых являются зарубежные фирмы [1, 2].

Для ускорения твердения и повышения прочности известковых композитов в рецептуру вводят добавки (алюминат натрия, фторид натрия, карбонат калия, хлорид кальция, аморфная окись алюминия, тонкодисперсный аморфный кремнезем и др.).

Для повышения стойкости композитов на основе минеральных вяжущих в их рецептуру вводят коллоидные дисперсии на основе диоксида кремния, что способствует существенному (до 30 %) сокращению количества пор размером от 1 нм и выше, повышению вододерживающей способности на 6 %, уменьшению расслаиваемости на 34 %, устранению высолов на поверхности отделочного покрытия [3–5].

В работе [6] для ускорения процесса твердения известки предлагается введение в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов. В [7] предложено применять в композитах на основе минеральных вяжущих синтезированные цеолиты. Авторами выявлены закономерности структурообразования известкового композита в присутствии добавки на основе синтетического цеолита, заключающиеся дополнительно в образовании гидросиликатов кальция-натрия и минералов группы цеолитов, увеличению количества химически связанной известки на 8,74 %.

В работах [8–10] предложено для повышения стойкости известковых покрытий применение синтезированных гидросиликатов (ГСК). Разработан известковый состав для отделки и реставрации стен зданий в виде сухой смеси, содержащий наполнитель на основе гидросиликатов кальция и позволяющий получить растворные смеси с вододерживающей способностью 98–99 %, временем высыхания до степени «5» 15–20 мин, жизнеспособностью 1–1,5 часа. Покрытия на основе предлагаемой ССС характеризуются коэффициентом паропроницаемости 0,05 мг/м·ч·Па, прочностью сцепления 0,6–0,9 МПа, прочностью при сжатии 3–4 МПа.

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных методам повышения стойкости известковых композитов, многие вопросы обеспечения их стойкости, особенно при реставрации объектов культурного наследия, остаются нераскрытыми. Учитывая закон сродства структур, для реставрации необходимо применять аутентичные реставрационные материалы. Это требует разработки состава, который по своим свойствам будет идентичен реставрируемому материалу. В связи с этим возникает необходимость учета свойств всех компонентов рецептуры и свойств реставрируемого объекта.

Нами предлагается для повышения стойкости известковых составов, применяемых для реставрации зданий исторической застройки, введение в рецептуру полисиликатного раствора.

Полисиликаты характеризуются широким диапазоном степени полимеризации анионов и являются дисперсиями коллоидного кремнезема в водном растворе силикатов щелочных металлов. Полисиликатные растворы содержат в своем составе мономерные, олигомерные и полимерные разновидности кремнезема, что способствует проявлению высокой реакционной способности кремнезема в составе различных композиций.

Для получения полисиликатного раствора в жидкое стекло вводили золь кремниевой кислоты Nanosil 20, выпускаемый ПК «Промстеклоцентр». Характеристики кремнезоля приведены в табл. 1. Применяли калиевое жидкое стекло с модулем  $M=3,29$  (ГОСТ 13078).

Характеристики кремнезоля Nanosil 20

Наименование показателей	Nanosil 20
pH	9-10,8
Массовая концентрация диоксида кремний, г/л	220-237
Массовая концентрация оксида натрия, г/л	3-7
Силикатный модуль	50-90
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г	220-370

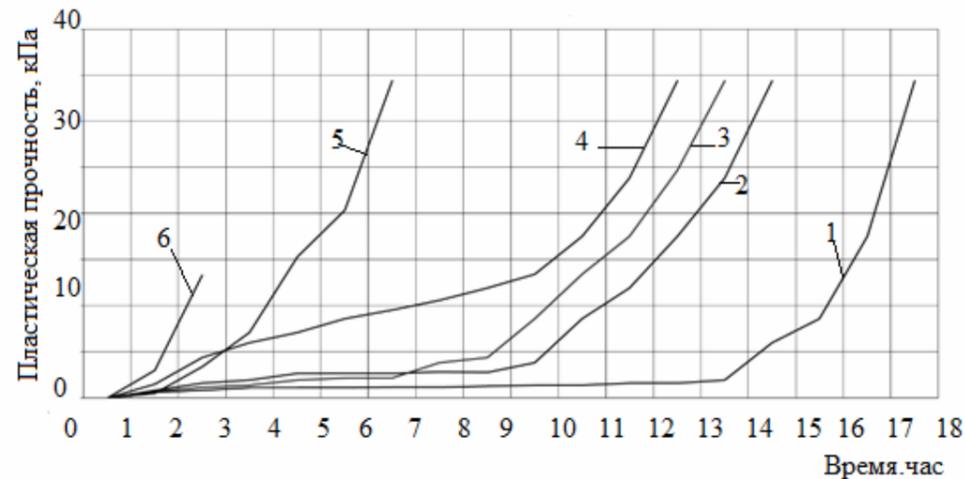
Установлено, что использование золя в количестве 10–15 % от массы жидкого стекла с модулем  $M=2,78$  позволяет получить полисиликатные растворы с модулем  $M=4,25-5,29$ . Молибдатным методом, основанным на различной скорости взаимодействия мономерных, олигомерных и полимерных кремнийкислородных анионов (ККА) с молибденовой кислотой, установлено, что при содержании золя 10 % содержание полимерной формы кремнезема  $\gamma\text{-SiO}_2$  составляет 12,68 %, суммарное содержание мономерных и олигомерных форм ( $\alpha\text{-SiO}_2+\beta\text{-SiO}_2$ ) – 17,71 %.

Эффективность применения полисиликатного раствора оценивали по изменению реологических свойств известковой смеси, а также по кинетике твердения. Пластическую прочность измеряли с помощью конического пластометра КП-3. Для сравнения в качестве добавки применяли жидкое стекло, золь кремниевой кислоты.

Кривые кинетики набора пластической прочности приведены на рисунке. Анализ пластограмм, представленных на рисунке, показал, что введение полисиликатного раствора способствует ускорению набора пластической прочности. Спустя шесть часов после затворения пластическая прочность при содержании полисиликатного раствора 5 % от массы известки составляет  $\tau=34,36$  кПа (кривая 5). Пластическая прочность контрольного состава спустя шесть часов составила  $\tau=1,17$  кПа (кривая 1). Введение полисиликатного раствора в количестве 10 % от массы известки приводит к резкому набору пластической прочности известковой смеси, и спустя два часа после затворения пластическая прочность составила  $\tau=7,6$  кПа (кривая 6). При введении полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы известки также наблюдается ускорение набора пластической прочности. Сравнительный анализ данных набора пластической прочности известковых составов с добавками жидкого стекла, золя кремниевой кислоты позволяет утверждать, что наблюдается синергетический эффект влияния полисиликатного раствора на структурообразование известковых отделочных составов, проявляющийся в ускорении набора пластической прочности. Так, спустя 9 часов с момента затворения пластическая прочность известкового состава с добавкой жидкого стекла составляла 8,59 кПа, с добавкой золя кремниевой кислоты – 3,81 кПа, а с добавкой полисиликатного раствора – 13,42 кПа.

В течение времени, пока раствор ещё не потерял своих пластических свойств, под действием силы тяжести может происходить смещение слоёв раствора относительно друг друга, в результате чего происходит деформация и нарушение сплошности штукатурного покрытия. В отечественном стандарте ГОСТ 10277 приведена методика определения стекания раствора с вертикальной поверхности визуальным методом [4]. Для этого пластинку с нанесенным раствором устанавливают в вертикальном положении (по длине пластинки) и выдерживают ее в течение 30 мин. Исследуемый раствор не должен стекать.

Нами отделочного слоя к сползанию оценивалась визуальным методом. Известковый состав с применением полисиликатного раствора обладает высокой стойкостью к сползанию при его нанесении на вертикальные поверхности. Для приготовления раствора в качестве наполнителя применяли кальцит в соотношении 1:3. Исследуемый раствор наносился на бетонную поверхность площадью 10×20 см с толщиной слоя от 5 до 20 мм и выдерживался в вертикальном положении в течение 5 мин, после чего оценивалась устойчивость к сползанию. Результаты исследований приведены в табл. 2.



Изменение пластической прочности известковой смеси:

1 – контрольный состав на известковом вяжущем; 2 – состав на известковом вяжущем с использованием золя кремниевой кислоты Nanosil 20 в количестве 1 % от массы извести; 3 – состав на известковом вяжущем с использованием жидкого стекла в количестве 1 % от массы извести; 4 – состав на известковом вяжущем с использованием полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы извести; 5 – состав на известковом вяжущем с использованием полисиликатного раствора в количестве 5 % от массы извести; 6 – состав на известковом вяжущем с использованием полисиликатного раствора в количестве 10 % от массы извести

Т а б л и ц а 2

Устойчивость отделочного слоя к сползанию

Состав	Предельное напряжение сдвига $\tau_0$ , кПа	Толщина слоя, мм					
		5	10	12	15	17	20
И:Н=1:3,В/И=1,26 (контрольный)	1,8	-	-	-	-	+	+
И:Н=1:4,В/И=1,26; добавка полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы вяжущего	9,1	-	-	-	-	-	-
И:Н=1:3,В/И=1,26; добавка полисиликатного раствора в количестве 5 % от массы вяжущего	27	-	-	-	-	-	-
И:Н=1:3,В/И=1,26; добавка золя кремниевой кислоты Nanosil 20 в количестве 1 % от массы вяжущего	2,51	-	-	-	-	-	-
И:Н=1:3,В/И=1,26; добавка жидкого стекла в количестве 1 % от массы вяжущего	2,49	-	-	-	-	-	+

Установлено, что известковый состав с добавкой полисиликатного раствора обладает устойчивостью к сползанию при толщине отделочного слоя до 20 мм.

Разработанный состав характеризуется хорошей удобоукладываемостью, время высыхания до степени 3 составляет 10 минут. Прочность сцепления покрытия с

подложкой из известнякового камня, определяемая методом отрыва шайб, составляет более 1,3 МПа (отрыв по подложке).

#### Список литературы

1. Голубев, В.И. Новые продукты на рынке добавок для сухих строительных смесей и бетонов / В.И. Голубев, П.Г. Василек // Строительные материалы. – 2006. – № 3. – С. 24–25.
2. Kakuta, S. Evaluation of Viscosity of Fresh Concret / S. Kakuta, M. Fujii, T. Akashi // Rev.33nd Gen. Meet, Cem. Assos. Jap.Tech. Sess. – Tokyo, 1979. – P. 129–131.
3. Комохов, П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита / П.Г. Комохов // Строительные материалы. – 2006. – №9. – С. 14–15.
4. Комохов, П.Г. Нанотехнология радиационностойкого бетона / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 5. – С. 22–23.
5. Каприелов, С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 1995. – №4. – С. 16–20.
6. Селяев, В.П. Влияние структуры цеолитсодержащих композитов на долговечность бетона / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшклина // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V акад. чтений / Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – Воронеж, 1999. – С. 394–398.
7. Логанина, В.И. Известковые отделочные составы с применением синтезированных алюмосиликатов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, И.В. Жерновский, М.А. Садовникова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 55–57.
8. Логанина, В.И. Штукатурные составы для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 38–40.
9. Логанина, В.И. Повышение водостойкости известковых составов / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – №1. – С.42–46.
10. Логанина, В.И. Структура и свойства тонкодисперсных наполнителей на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, К.А. Сергеева // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №2(31). – С.167–169.

#### References

1. Golubev, V.I. New products on the market of additives for dry mortar and concrete / V.I., Golubev P.G. Vasilik // Construction Materials. – 2006. – No 3. – P. 24–25.
2. Kakuta, S. Evaluation of Viscosity of Fresh Concret / S. Kakuta, M. Fujii, T. Akashi // Rev.33nd Gen. Meet, Cem. Assos. Jap.Tech. Sess. – Tokyo, 1979. – P. 129–131.
3. Komokhov, P.G. Sol-gel as a concept of cement composite nanotechnology / P.G. Komokhov // Construction Materials. – 2006. – No. 9. – P. 14–15.
4. Komokhov, P.G. Nanotechnology of radioactive concrete / P.G. Komokhov // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2006. – No. 5. – P. 22–23.
5. Kaprielov, S.S. General patterns of formation of the structure of cement stone and concrete with the addition of ultradispersed materials / S.S. Kaprielov // Concrete and reinforced concrete. – 1995. – No. 4. – P. 16–20.
6. Selyaev, V.P. Influence of the structure of zeolite-containing composites on the durability of concrete / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina // Modern problems of building materials science: materials of the V acad. readings / Ros. acad. Architecture and builds. sciences. – Voronezh, 1999. – P. 394–398.

7. Loganina, V.I. Lime finishing compositions with the use of synthesized aluminosilicates / V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, I.V. Zhernovsky, M.A. Sadovnikova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 2. – P. 55–57.

8. Loganina, V.I. Plastering compositions for restoration work using colored fillers / V.I. Loganina, L.V. Makarova // Regional architecture and engineering. – 2009. – No. 1. – P. 38–40.

9. Loganina, V.I. Increasing the water resistance of lime compounds / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov. – 2012. – No 1. – P.42–46.

10. Loganina, V.I. The structure and properties of finely dispersed fillers based on calcium silicates for dry building mixtures / V.I. Loganina, L.V. Makarova, K.A. Sergeeva // Bulletin of civil engineers. – 2012. – No. 2 (31). – P. 167–169.

УДК 691.5

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

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

**Зайцева Мария Владимировна**,  
аспирант кафедры «Управление качеством  
и технология строительного производства»

*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

**Zaitseva Maria Vladimirovna**,  
Postgraduate of the department «Quality  
Management and Construction Technologies»

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИЗВЕСТКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВКОЙ ПОЛИСИЛИКАТНОГО РАСТВОРА

В.И. Логанина, М.В. Зайцева

Приведены сведения о физико-химическом взаимодействии полисиликатного раствора с известью. Показано, что более высокие значения теплоты смачивания полисиликатного раствора с известью по сравнению с водой обусловлены дополнительно выделившейся теплотой вследствие взаимодействия извести с полисиликатным раствором. Результаты дифференциально-термического анализа свидетельствуют, что эндотермический эффект в интервале температур 469-519,7°С характеризует дегидратацию гидросиликатов кальция, образовавшихся при взаимодействии извести с полисиликатным раствором. Показано, что введение в известковый состав добавки полисиликатного раствора способствует повышению прочности при сжатии в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения в 1,37–1,69 раза.

*Ключевые слова: известь, полисиликатный раствор, теплота смачивания, работа адгезии, прочность*

## STRUCTURE FORMATION OF LIME COMPOSITIONS WITH A POLYSILICATE SOLUTION ADDITION

V.I. Loganina, M.V. Zaytseva

Some information on the physical and chemical interaction of a polysilicate solution with lime is given. It is shown that the higher values of wetting heat of polysilicate solution with lime in comparison with water are due to the additionally released heat due to the interaction of lime with a polysilicate solution. The results of differential thermal analysis indicate that the endothermic effect in the temperature range 469-519.7 ° C characterizes the dehydration of calcium hydrosilicates formed during the interaction of lime with a polysilicate solution. It is shown that the addition of a polysilicate solution to a lime composition increases the compressive strength at the age of 28 days of air-dry hardening by 1.37-1.69 times.

*Keywords: lime, polysilicate solution, heat of wetting, work of adhesion, strength*

На сегодняшний день на рынке отделочных материалов, применяемых для реставрации объектов культурного наследия, имеется большое количество зарубежных известковых составов или отечественных с применением импортных добавок [1]. Одними из самых популярных известковых красок для реставрации объектов культурного наследия являются краски «Холви», «Кальцемур», «Силакра-известковая», «Антик 1» и «Антик 2» и др., содержащие в составе целевые добавки, производителями которых в основном являются зарубежные фирмы.

В работах [2, 3] для регулирования реологических, технологических свойств известковых составов и эксплуатационных свойств покрытий на их основе предложено в рецептуру вводить тиксотропные органоминеральные добавки на основе местного сырья.

В работе [4] для ускорения процесса твердения извести предлагается введение в рецептуру известковых составов добавки на основе природных цеолитов.

Анализ патентной и научно-технической литературы свидетельствует о перспективности применения активированного диатомита в известковых составах, предназначенных для реставрации и отделки стен зданий [5–7].

Рецептуры большинства отделочных смесей на основе минеральных вяжущих содержат редиспергируемые добавки, повышающие в том числе прочность сцепления.

Учитывая, что стоимость редиспергируемых добавок в структуре себестоимости состава составляет около 60–80 %, нами предлагается для повышения стойкости известковых составов, применяемых для реставрации зданий исторической застройки, введение в рецептуру полисиликатного раствора.

Для получения полисиликатного раствора в жидкое стекло вводили золь кремниевой кислоты Nanosil 20, выпускаемый ПК «Промстеклоцентр». Применяли калиевое жидкое стекло с модулем  $M=3,29$  (ГОСТ 13078). Установлено, что использование золя в количестве 10–15 % от массы жидкого стекла с модулем  $M=2,78$  позволяет получить полисиликатные растворы с модулем  $M=4,25–5,29$  [8–10]. Молибдатным методом, основанным на различной скорости взаимодействия мономерных, олигомерных и полимерных кремнийкислородных анионов (ККА) с молибденовой кислотой, установлено, что при содержании золя 10 % содержание полимерной формы кремнезема  $\gamma\text{-SiO}_2$  составляет 12,68 %, суммарное содержание мономерных и олигомерных форм ( $\alpha\text{-SiO}_2+\beta\text{-SiO}_2$ ) – 17,71 %.

При разработке рецептуры состава для реставрации была применена гашеная известь (пушонка) активностью 71–76 %, истинной плотностью  $2230 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $280 \text{ кг/м}^3$ , с удельной поверхностью  $S_{уд} 559 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В качестве наполнителя применяли микрокальцит марки LinCarb-2x, маршалит марки А, кварцевый песок. Для оценки физико-химического взаимодействия извести с полисиликатным раствором была оценена работа адгезии к извести и теплота смачивания. Значения работы жидкости к извести рассчитывали по формуле

$$A = \sigma (1 + \cos \theta). \quad (1)$$

Определение поверхностного натяжения проводили методом счета капель (сталагмометрический метод). В качестве эталонной жидкости использовали дистиллированную воду с плотностью  $\rho_m^{20^\circ\text{C}} = 0,9982 \text{ г/см}^3$  и поверхностным натяжением  $\sigma^{20^\circ\text{C}} = 72,8 \text{ мН/м}$ .

Измерение смачивающей способности полисиликатного раствора производили по углу смачивания (краевой угол  $\theta$ ). Исследования выполнены с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Краевой угол смачивания определяли на приборе KRUSSDSA-30. Для определения краевого угла смачивания были заформованы таблетки из извести с помощью автоматического гидравлического пресса Vapeox-40t automatic с давлением в 18 тонн за 11 секунд. Порошок прессовали в сухом состоянии, без дополнительной обработки. Поверхностное натяжение растворов определяли сталагмометрическим методом.

Связь между работой адгезии и работой смачивания определялась соотношением

$$W = A - \sigma. \quad (2)$$

Для определения энтальпии смачивания применялся сосуд Дьюара, расчет проводили по формуле

$$H_{см} = \frac{\Delta T (c_{из} m_{из} + c_{жид} m_{жид})}{m_{из}}, \quad (3)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\Delta T$  – изменение температуры,  $^\circ\text{C}$ ;  $m_{жид}$  – масса жидкости,  $\text{кг}$ ;  $m_{из}$  – масса извести,  $\text{кг}$ .

Результаты исследований и расчетов приведены в табл. 1

Т а б л и ц а 1

Значения работы смачивания

Наименование ингредиентов	Работа адгезии, мН/м	Работа смачивания, мН/м	Удельная теплота смачивания, кДж/кг
Известь+вода	116,6	43,8	10,6
Известь+ полисиликатный раствор	106,78	36,98	17,3
Известь+ полисиликатный раствор+ добавка Хидетал П-4	108,38	38,86	18,4

При взаимодействии извести с полисиликатным раствором создаются более благоприятные условия. Результаты исследований показывают, что работа адгезии воды к извести составляет  $116,61 \text{ мН/м}$ , а полисиликатного раствора –  $106,78 \text{ мН/м}$ . Введение добавки Хидетал П-4 несколько способствует повышению работы адгезии, составляющей  $108,36 \text{ мН/м}$ . Количество удельной теплоты, выделившейся при смачивании извести полисиликатным раствором, составило  $17,3 \text{ кДж/кг}$ , а при смачивании извести водой –  $10,6 \text{ кДж/кг}$ . Более высокие значения теплоты смачивания, на наш взгляд, обусловлены дополнительно выделившейся теплотой вследствие взаимодействия извести с полисиликатным раствором (рис. 1).

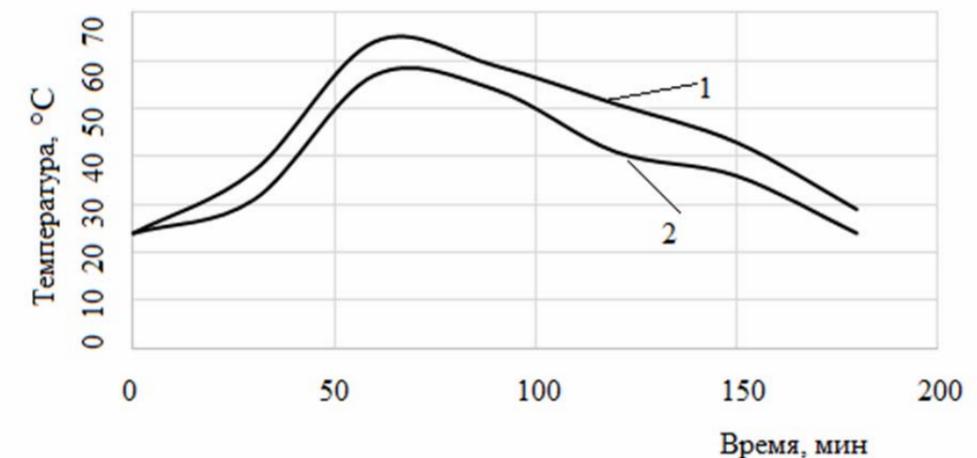


Рис. 1. Изменение температуры в процессе структурообразования известковой системы: 1 – известковый состав с добавкой полисиликатного раствора; 2 – контрольный состав

Введение добавки полисиликатного раствора способствует повышению теплоты структурообразования известкового композита (см. рис. 1). Максимальная температура структурообразования составляет  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  и достигается спустя 60 мин.

Полученные результаты нашли дополнительное подтверждение при дифференциально-термическом анализе (ДТА) с помощью установки «Термоскан-2». При ДТА известкового композита установлено, что тепловой эффект при температуре  $90–150 \text{ }^\circ\text{C}$  связан с удалением свободной воды. Интенсивный эндоэффект на обоих термограммах в интервале температур  $520–650 \text{ }^\circ\text{C}$  связан с дегидратацией портландита. При сравнении термограмм выявлено, что тепловой эффект, связанный с дегидратацией портландита, в контрольных образцов больше и составляет  $Q=73,641 \text{ Дж}$  (рис. 2, кривая 1), что обусловлено большим содержанием в данных образцах портландита. Тепловой эффект в образцах на основе состава с добавкой полисиликатного раствора

составляет  $Q=21,41$  Дж (рис. 2, кривая 2). Эндоэффект в интервале температур 469–519,7°C (рис. 2, кривая 2), равный  $Q=0,5729$  Дж, характеризует дегидратацию гидросиликатов кальция. Тепловой эффект при температуре 800–1000°C характеризует диссоциацию кальцита.

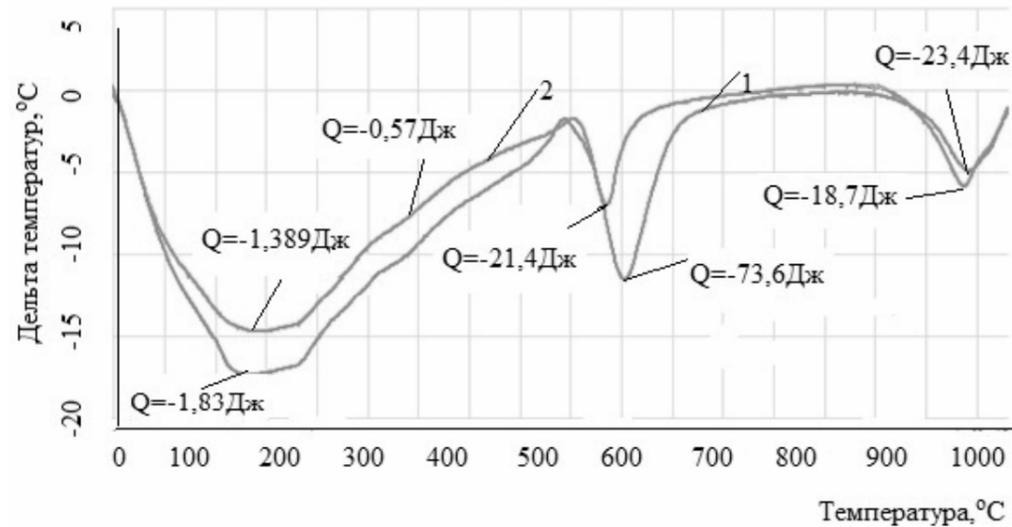


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа образцов:

1 – контрольный образец; 2 – образец с применением добавки полисиликатного раствора

Для изучения структурообразования известковых композитов изготавливали образцы, содержание полисиликатного раствора составляло 1–10 % от массы извести. Образцы твердели в воздушно-сухих условиях при температуре 18–20°C и относительной влажности воздуха 60–70 %. Затем было проанализировано влияние наполнителя и его содержания на прочность при сжатии известкового композита. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Влияние наполнителя на прочность при сжатии известкового композита

Вид наполнителя	Содержание наполнителя	Прочность при сжатии, МПа
Песок фракции 0,315-0,63	1:3, В/И=1,26	1,09
Маршалит	1:1, В/И=1,26	1,53
	1:2, В/И=1,26	1,46
	1:3, В/И=1,26	1,39
Микрокальцит	1:1, В/И=1,26	1,83
	1:2, В/И=1,26	1,78
	1:3, В/И=1,26	1,69
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 5 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,3
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,1
Микрокальцит, добавка полисиликатного раствора в количестве 10 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	2,6
Микрокальцит, добавка золя кремниевой кислоты в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	1,85
Микрокальцит, добавка жидкого стекла в количестве 1 % от массы извести	1:3, В/И=1,26	1,79

Установлено, что прочность при сжатии известковых композитов с применением в качестве наполнителя микрокальцита выше и составляет в зависимости от соотношения «известь:наполнитель» 1,69–1,83 МПа, с применением маршалита – 1,39–1,53 МПа. Введение полисиликатного раствора в известковую смесь приводит к повышению прочности при сжатии, составляющую при содержании добавки 10 % от массы извести 2,6 МПа.

Учитывая, что разрабатываемый состав предполагается применять при отделке и реставрации зданий, в том числе и известняковых поверхностей, руководствуясь принципом сродства структур, в дальнейшем в качестве наполнителя применяли только микрокальцит [11, 12].

Для повышения прочности и водостойкости известковых композитов предложено вводить в их состав белый цемент. Оптимальное содержание белого цемента определялось по показателям прочности при сжатии и паропроницаемости покрытий. Зависимость прочности при сжатии от содержания белого цемента приведена в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Влияние содержания белого цемента на прочность при сжатии известковых образцов

Содержание белого цемента, % от массы извести	Прочность при сжатии, МПа
0	2,3
1	2,6
5	2,8
10	3,5

Использование белого цемента способствует росту прочности известкового композита. Так, прочность при сжатии образцов после 28 суток воздушного твердения с применением белого цемента равна  $R_{сж}=2,6–3,5$  МПа, прочность контрольного образца равна  $R_{сж}=2,3$  МПа.

Разработанный состав рекомендуется применять для реставрации зданий исторической застройки, реставрации сооружений из природного известняка, отделки вновь строящихся объектов. Состав характеризуется хорошей удобоносимостью, время высыхания до степени 5 составляет 30 мин, прочность сцепления – 1,3–1,6 МПа.

#### Список литературы

- Пухаренко, Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1. – С. 98–103.
- Логанина, В.И. Перспективы изготовления органоминеральной 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.
- Логанина, В.И. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей / В.И. Логанина, Н.А. Петухова, Э.Р. Акжигитова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 8–12.
- Селяев, В.П. Влияние структуры цеолитсодержащих композитов на долговечность бетона / В.П. Селяев, Л.И. Куприяшклина // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V академических чтений / Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – Воронеж, 1999. – С. 394–398.
- 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.
- Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Malaszkievicz // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 65. – С. 29–37.

7. Пустовгар, А.П. Эффективность применения активированных диатомитов в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С.3–6.

8. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I., Loganina S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P. e00173.

9. Логанина, В.И. Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 8 (704). – С. 74–79.

10. Айлер, Р. Химия кремнезема: в 2 т. / Р. Айлер. – М.: Мир, 1982.

11. Чулкова, И.Л. Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 6. – С.83–88.

12. Чулкова, И.Л. Возможность использования сухих смесей для реставрации и реконструкции объектов старины из известняка на основе закона сродства структур / И.Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – №6(34). – С.66–69.

#### References

1. Pukharenko, Yu.V. Restoration of historical objects with the use of modern dry building mixtures / Yu.V. Pukharenko, A.M. Kharitonov, N.N. Shangina, T.Yu. Safonova // Bulletin of civil engineers. – 2011. – No. 1. – P. 98–103.

2. Loganina, V.I. Prospects for the manufacture of organomineral 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.

3. Loganina, V.I. Development of an organomineral additive for dry building mixtures / V.I. Loganina, N.A. Petukhova, E.R. Akzhigitova // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. – 2011. – No. 3. – P. 8–12.

4. Selyaev, V.P. Influence of the structure of zeolite-containing composites on the durability of concrete / V.P. Selyaev, L.I. Kupriyashkina // Modern problems of building materials science: materials of the V acad. readings / Ros. acad. Architecture and builds. sciences. – Voronezh, 1999. – P. 394–398.

5. Loganina, V.I. Influence of activation of diatomite 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.

6. Loganina, V.I. Application of activated diatomite for dry lime mixes / V.I. Loganina, E.E. Simonov, W. Jezierski, D. Małaskiewicz // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 65. – С. 29–37.

7. Pustovgar, A.P. The effectiveness of the use of activated diatomaceous earth in dry building mixtures / A.P. Pustovgar // Building materials. – 2006. – No. 10. – P.3–6.

8. Loganina, V.I. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls / V.I., Loganina S.N. Kislitsyna, Y.B. Mazhitov // Case Studies in Construction Materials. – 2018. – Vol. 9. – P. e00173.

9. Loganina, V.I. Properties of liquid glass with the addition of silicic acid sol / Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Mazhitov E.B. // Bulletin of higher educational institutions. Construction. – 2017. – No. 8 (704). – P. 74–79.

10. Eiler, P. Chemistry of silica: in 2 vol. / P. Eiler. – М.: Мир, 1982.

11. Chulkova, I.L. Structure formation of building composites based on the principle of affinity of structures / I.L. Chulkova // Vestnik SibADI. – 2012. – No. 6. – P.83–88.

12. Chulkova, I.L. Possibility of using dry mixes for restoration and reconstruction of ancient objects from limestone on the basis of the law of affinity of structures / I.L. Chulkova // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy. – 2013. – №6 (34). – P.66–69.

УДК 519.7:378.1

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  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

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

**Budylina 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  
of the department «Mathematics  
and Mathematical Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Danilov Alexander Maksimovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, Head of the  
department «Mathematics and Mathematical  
Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

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

Быстрое отделение друг от друга философии и математики привело к возникновению ряда неразрешимых теоретических и прикладных задач синтеза систем: философский подход не ставит своей целью разрешение проблемы, а лишь обозначает ее. Основным междисциплинарным подходом является синергетика с анализом бифуркаций. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий с его развитием до уровня математической теории. Налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем. Исходя из этого ниже приводятся результаты комплексных исследований с позиций системного анализа научных и технических проблем, связанных с разработкой материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

*Ключевые слова: сложные системы, анализ, синтез, композиционные материалы, принципы проектирования, декомпозиция, идентификация, оценка качества, управление свойствами*

## SYSTEM RESEARCH IN MATERIALS SCIENCE

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

A rapid separation of philosophy and mathematics has led to the emergence of a number of insoluble theoretical and applied problems of systems synthesis: the philosophical approach does not set a goal of solving the problem, but only denotes it. The main interdisciplinary approach is synergetics with bifurcation analysis. A synthesis apparatus based on the integration of interdisciplinary categories with its development to the level of mathematical theory is required. There is a need and demonstration of the development capabilities in the field of systems synthesis. Hence the results of complex studies from the standpoint of a systematic analysis of scientific and

technical problems associated with the development of materials with a given set of operational properties are stated.

*Keywords: complex systems, analysis, synthesis, composite materials, design principles, decomposition, identification, quality assessment, property management*

### 1. Системы, атрибуты

Существуют различные мнения относительно системных исследований: от восторженного до оценки системного анализа как несостоявшейся науки. Что касается их практического приложения, то *«есть только отдельные опыты применения системной методологии, причем и они отличаются сравнительно небольшим масштабом решаемых задач; ... системный подход к настоящему времени реализует себя, скорее, как искусство, чем как наука, технология и учебная дисциплина»* [1]. Налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем. Наблюдающееся в последнее время быстрое отделение друг от друга философии и математики привело к возникновению ряда неразрешимых теоретических и прикладных задач синтеза систем: *философский подход не ставит своей целью разрешения проблемы, а лишь обозначает ее*. Основным междисциплинарным подходом является *синергетика с анализом бифуркаций*. Оценка сложности системы (по Колмогорову, сложность объекта определяется как *минимальный размер количества информации, задающей этот объект*) может производиться по-разному. *Основной проблемой синтеза при системном подходе является усиливающаяся фрагментация знания. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий с его развитием до уровня математической теории. Адекватность модели* определяется принятыми принципиальными гипотезами о механизмах функционирования объекта.

Рассмотрим *результаты комплексных исследований с позиций системного анализа научных и технических проблем* [2...5], связанных с разработкой материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства: установление взаимосвязи состава, технологии производства, а также структуры и свойств материала. Наличие в композиционных материалах границы раздела фаз определяет интенсивность процессов формирования структуры. Изучение процессов структурообразования материала, разработка способов и поиск компонентов для повышения его качества, а также уточнение существующих и введение новых характеристик материала позволяют совершенствовать методы проектирования и прогнозирования влияния рецептуры на свойства композита. При исследованиях *композиционный материал рассматривается как сложная система*. Строится иерархическая структура критериев качества, в соответствии с ней – иерархическая структура собственно материала. На основе общих принципов системного анализа производится *декомпозиция системы*, устанавливаются связи между подсистемами.

Возможен и другой подход к синтезу: на основе определения интегративных свойств систем с использованием *автономных исследований сепаратных подсистем осуществляется декомпозиция системы*. Каждый элемент иерархической структуры системы, находящийся на определенном уровне, представляется как модуль. Устранение межсистемных связей при автономных исследованиях сепаратных подсистем можно обеспечить введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам.

В основе проектирования систем лежит общая формулировка технического задания на проектирование [6]. Разработка материала осуществляется методом моделирования: множество взаимосвязанных моделей с необходимой точностью будет описывать систему, отражая всю совокупность ее свойств. Фактически проектирование системы (материала) сводится к построению ее сложной модели [7]. Проект системы объединяет частные взаимосвязанные и взаимообусловленные модели. Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средство дости-

жения целей проектирования) осуществляется на основе некоторого показателя (критерия выбора), обобщенно характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. При проектировании системы с длительным периодом эксплуатации следует учитывать не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируемые изменения. Отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть возможность ее различных модификаций. Наконец, проектирование с системных позиций – это проектирование части целого как элемента целого: критерием оценки является *обобщенный показатель*, обеспечивающий оптимальность всей системы в принятом смысле.

Однако справедливости ради отметим, что пока иерархическая структура композиционного материала (соответствует иерархической структуре критериев качества) не дает четкого ее представления как сложно организованной системы, в которой постоянно происходит большое количество параллельных процессов. На определенном этапе формирования материала горизонтальные связи на каждом из уровней иерархии могут оказаться сравнимыми или даже превышать *межуровневые связи*.

При изучении строительных материалов сложные явления, процессы расчленяются на множество составных элементов (системы различной природы) и определяются системообразующие межэлементные связи и отношения, придающие целостность. Возможен и другой способ выделения системы – это представление не всего исследуемого объекта, явления или процесса как системы, а только его отдельных сторон, аспектов, граней, разрезов, являющихся существенными для исследуемой проблемы. Нередко изменение любого элемента системы оказывает воздействие на другие ее элементы и ведет к изменению всей системы. Поэтому *часто невозможно разложить строительный материал как целостную систему на отдельные компоненты без потерь ее интегративных свойств*.

Системные исследования являются симбиозом теоретических модельных экспериментов с наблюдениями, эмпирическими исследованиями, натурными (лабораторными) экспериментами. Именно *системный подход позволяет разобраться в связях между отдельными фактами и на более высоком уровне осуществлять исследования*.

Нами каждое из свойств материала исследовалось по одной или нескольким упрощенным (узко ориентированным) моделям [8...10]. Нарастивание множества упрощенных моделей позволило выявлять новые свойства нередко и без построения обобщающей модели.

### 2. Проектирование, модификации, критерии оценки

Выбор проектного решения из числа возможных альтернативных вариантов (средство достижения целей проектирования) обычно осуществляется на основе показателей (критериев выбора), обобщенно характеризующих степень достижения поставленной цели в том или ином варианте проекта. Обычно любые изменения внешней среды влияют на систему; верно и обратное: свойства внешней среды (динамическая система) изменяются при работе системы. Поэтому при проектировании системы с длительным периодом эксплуатации не только учитывается сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируются ее изменения.

Система состоит из взаимосвязанных компонентов и представляет собой определенную целостность; изменение параметров любого из компонентов вызывает изменение работы системы и ее выходных параметров. Это приводит к *необходимости предусматривать при проектировании возможные отказы (нарушение работоспособности) подсистем и передачу функций одних подсистем другим*. В определенных случаях может использоваться резервирование подсистем (простейший случай – дублирование: наряду с основной подсистемой имеется и резервная подсистема).

Основная системная проблема определяется в виде: «целое больше суммы его частей» (свойства предметов и способы действия на высших уровнях не могут быть представлены в виде суммы свойств и действий изолированных компонентов). Однако если известны компоненты и существующие между ними отношения, то высшие

уровни могут быть выведены, исходя из компонентов. Для того чтобы понять организованную целостность, нужно знать не только компоненты, но и отношения между ними. *Методологическая неприспособленность традиционной науки для анализа отношений в системах и недостаточность имеющихся математических методов являются причиной того, что системные проблемы во многом до сих пор остаются философскими и до конца не сформировались как наука. Пока многочисленные успехи классической науки не привели к пересмотру ее фундаментальной парадигмы – однолинейной причинности и расчленения предмета исследования на элементарные составляющие.*

Формулировка общих принципов исследования систем в общей теории систем до сих пор не произведена. Система может быть охарактеризована только через взаимодействие составляющих элементов. Различие между реальными и концептуальными системами на уровне простого здравого смысла практически невозможно установить. Различные аспекты функционирования системы всегда будут изучаться на основе разных моделей и соответствующих теорий, что в итоге может привести к их унификации. Добиться оптимизации всех критериев одновременно невозможно в принципе. Реально возможно достичь только некоторого компромисса (сочетания требуемых качеств). С ростом уровня качественного описания возрастает сложность модели. Так как при проектировании с системных позиций производится проектирование части целого как элемента целого, то критериями оценки системы являются ее показатели, обеспечивающие оптимальность системы в целом и подсистем на соответствующих уровнях.

### 3. Из опыта разработки материалов: концептуальные подходы к синтезу

Метод исследования реальной действительности отличается цикличностью: факты, завершающие один цикл, являются началом и основой следующего цикла. Если наблюдения не подтверждают справедливость предсказаний, ведется поиск более совершенной теории. Иногда указанная схема исследований не выдерживается: теории появляются до обнаружения соответствующих явлений, или теории, обоснованные наблюдениями, остаются непроверенными. Таким образом, исследование может начинаться с любого этапа. Разработка методологических принципов синтеза строительных материалов на основе моделирования процессов формирования их структуры и свойств сводится к решению ряда взаимосвязанных задач:

- в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач строится иерархическая структура системы (материала) с оценками её элементов (служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем);
- определяются методологические принципы синтеза строительных материалов с использованием классической теории управления, методов системного анализа в сочетании с экспериментальными, эвристическими методами материаловедения;
- осуществляется идентификация кинетических процессов формирования структуры и основных физико-механических характеристик материала с оценкой точности их математического моделирования;
- разрабатывается обобщенная модель кинетических процессов;
- определяются связи между параметрами структуры и кинетических процессов;
- строятся функционалы качества;
- анализируются возможности и выбор метода преодоления неопределенностей целей;
- предлагается единая концепция синтеза строительных материалов, допускающая использование итеративного способа.

Связанная с проблемой многокритериальности неопределенность целей преодолевается с использованием линейной свертки (глобального критерия качества); введения контрольных показателей  $f_i^*$  для частных критериев, таких, что  $f_i(\mathbf{x}) \geq f_i^*$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и выделения основного критерия (например, ограничения по стоимости, температурной

и радиационной стойкости, энергопотреблению, безопасности технологии и т.д.); построения множеств Парето [11].

В большинстве случаев целевая функция может определяться исходя из желаемого вида кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик композиционных строительных материалов (прочность, модуль упругости, контракция и усадка, нарастание внутренних напряжений, химическая стойкость, водопоглощение и водостойкость и т.д.) на основе решения сначала общей, а затем частной задачи идентификации. Такой выбор целевой функции, в частности, определяется возможностью установления связи между строением композиционного материала и проявляющимися при соответствующих условиях изменениями макроскопических характеристик. С учетом перекрестных связей между свойствами материала осуществляется уточнение структурных и математических моделей систем и подсистем с последующей идентификацией параметров (для отдельных систем – из условий получения экстремумов целевых функций).

Хорошие результаты дает использование диаграмм и принципа Парето [12] при управлении качеством материалов (*авторам неизвестен случай их использования при синтезе материалов*). Как подтвердили многочисленные исследования, применение принципа Парето значительно облегчает разработку рецептуры (содержание ингредиентов, гранулометрический состав и т.д.), помогает выделить элементы в рецептуре, определяющие, в основном, эксплуатационные характеристики материала. Принцип Парето также облегчает итеративное улучшение качества материала на основе последовательного построения на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето.

### Выводы

1. Приводятся результаты комплексных исследований с позиций системного анализа научных и технических проблем, связанных с разработкой материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства.
2. Определены концептуальные подходы к синтезу.

### Список литературы

1. Сизиков, В.П. Кризис системной методологии: с позиций синтеза систем / В.П. Сизиков, В.И. Разумов // Идентификация систем и задачи управления: труды V Международной конференции SICPRO'06. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. – С. 1818–1860.
2. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 143–159.
3. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2524–2527.
4. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.
5. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.
6. Гарькина, И.А. Единая концепция системного проектирования сложных систем / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 119–123.
7. 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.
8. Данилов, А.М. Приближенные методы аналитического конструирования композиционных материалов / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1 (38). – С. 24–29.

9. Garkina, I. Kinetic processes in polydisperse systems: experience of practical approximation / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 814. – P. 33.

10. Иноземцев, А.С. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, Т.К. Доунг // Строительные материалы. – 2020. – № 4-5. – С. 90–96.

11. Будылина, Е.А. Из опыта системного проектирования композиционных материалов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 16–23.

12. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С.67–73.

#### References

1. Sizikov, V.P. The crisis of system methodology: from the standpoint of systems synthesis / V.P. Sizikov, V.I. Razumov // Identification of systems and control problems: Proceedings of the V International conference SICPRO'06. – M.: Institute of Control Science. V.A. Trapeznikov RAS, 2006. – P. 1818–1860.

2. Korolev, E.V. Prospects for the development of building materials science / E.V. Korolev // Academia. Architecture and construction. – 2020. – № 3. – P. 143–159.

3. Garkina, I.A. Methodological principles design of composite materials / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.A. Budylna // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, №11. – P. 2524–2527.

4. Garkina, I.A. Materials as complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.P. Selyaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 11. – P. 2461–2464.

5. Korolev, E.V. Analysis of the structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Building materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61

6. Garkina, I.A. Unified concept of system design of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2019. – №1 (38). – P. 119–123.

7. Garkina, I.A. Design and optimization of properties of complex systems / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Regional architecture and engineering. – 2018. – № 4 (37). – P. 5–11.

8. Danilov, A.M. Approximate Methods for the Analytical Design of Composite Materials / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 1 (38). – P. 24–29.

9. Garkina, I. Kinetic processes in polydisperse systems: experience of practical approximation / I. Garkina, A. Danilov // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 814. – P. 33.

10. Inozemtsev, A.S. Structural model of the flow of plasticized cement-mineral mixtures / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev, T.K. Doung // Building materials. – 2020. – № 4–5. – P. 90–96.

11. Budylna, E.A. From the experience of system design of composite materials / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2020. – №2 (43). – P. 16–23.

12. Garkina, I.A. Quality control of materials with special properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control problems. – 2008. – № 6. – P.67–73.

УДК 691.3

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана  
Казахстан, 090009, Уральск,  
ул.Жангир хана, 51

**Монтаев Сарсенбек Алиакбарович**,  
доктор технических наук, профессор  
высшей школы «Строительство и  
строительные материалы»  
E-mail: montaevs@mail.ru

**Досов Каржаубай Жанабаевич**,  
ст.преподаватель Высшей школы  
«Строительство и строительные  
материалы»  
E-mail: cargau\_68@mail.ru

**Адилова Нургуль Болатовна**,  
кандидат технических наук,  
ассоциированный профессор Высшей  
школы «Строительство и строительные  
материалы»  
E-mail: adnur@mail.ru

**Таудаева Айнур Амангалиевна**,  
докторант высшей школы «Строительство  
и строительные материалы»  
E-mail: taudaeva\_80@mail.ru

Западно-Казахстан Agrarian-Technical  
University named after V.I. Zhangir Khana  
Kazakhstan, 090009, Uralsk, 51,  
Zhangir Khan St.

**Montaev Sarsenbek Aliakbarovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the Higher  
School «Construction and Building Materials»  
E-mail: montaevs@mail.ru

**Dosov Karzhaubai Zhanabaevich**,  
Senior Lecturer at the Higher School  
«Construction and Building Materials»  
E-mail: cargau\_68@mail.ru

**Adilova Nurgul Bolatovna**,  
Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor of the Higher School «Construction  
and Building Materials»  
E-mail: adnur@mail.ru

**Taudaeva Ainur Amangaliyeva**,  
Doctoral student of the higher school  
«Construction and building materials»  
E-mail: taudaeva\_80@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЫРЬЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ И ПОРИСТОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННО-КОНСТРУКЦИОННОЙ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ

С.А. Монтаев, К.Ж. Досов, Н.Б. Адилова, А.А. Таудаева

Представлены результаты комплексных исследований химико-минералогических составов и физико-механических свойств сырьевых материалов: доменного гранулированного шлака Карагандинского металлургического завода АО «Алселор Миттал Темиртау», глинистого сырья, кремнистой породы-опоки и бентонитовой глины Погодаевского месторождения Западного Казахстана. Исследованию подвергались два состава сырьевых материалов: суглинок 70–90 % + доменный гранулированный шлак 10–30 % и опока 75–97 % + бентонитовая суспензия 3–25 %. Установлена возможность получения эффективных и востребованных материалов в виде керамического заполнителя и теплоизоляционно-конструкционной стеновой керамики на основе разработанных композиционных составов.

*Ключевые слова:* сырьевые материалы, керамика, заполнитель, отходы производства, теплоизоляционные материалы, стеновые материалы, дорожный материал

## INVESTIGATION OF RAW MATERIALS FOR CERAMIC AGGREGATES AND POROUS HEAT-INSULATING – STRUCTURAL WALL CERAMICS

S.A. Montaev, K.Zh. Dosov, N.B. Adilova, A.A. Taudaeva

The article presents the results of comprehensive studies of chemical and mineralogical compositions and physical and mechanical properties of raw materials in the form of granulated blast

furnace slag of the Karaganda metallurgical plant JSC «AyselorMittal Temirtau», clay raw materials, siliceous rock – flask and bentonite clay of the Pogodaevsky deposit in Western Kazakhstan. Two compositions of raw materials loam 70–90 % + blast-furnace granulated slag 10–30 % and flask 75–97 % + bentonite Suspension 3–25 % have been studied. The possibility of obtaining effective and demanded materials in the form of ceramic filler and heat-insulating-structural wall ceramics based on the developed composite compositions has been established.

*Keywords: raw materials, ceramics, aggregate, production waste, thermal insulation materials, wall materials, road material*

**Введение.** Растущие темпы строительства жилищных, промышленных, дорожных и сельскохозяйственных объектов в Казахстане приводят к потреблению огромного количества материалов, изделий и конструкций, изготавливаемых из сырья минерального происхождения. В то же время техногенно-минеральные отходы в республике Казахстан сегодня составляют более 20 млн тонн; они приносят вред окружающей среде, занимая огромные площади отвалов, хотя могли бы послужить дешевой сырьевой базой для создания дефицитных строительных материалов. Для успешного использования техногенно-минеральных отходов требуется разработка научно обоснованных инновационных решений по созданию ресурсо- и энергосберегающих технологий производства качественных строительных материалов.

При этом наиболее востребованными сегодня материалами при строительстве дорог являются крупные заполнители в виде щебня, искусственные заполнители, а при строительстве зданий и сооружений – стеновая керамика.

В Казахстане объем отвалов с накопленными миллионами тонн неиспользуемых доменных шлаков на базе АО «Арселор Миттал Темиртау» приблизился к предельно-допустимым нормам. Исследования авторов [1–5] доказывают пригодность использования этого побочного промышленного продукта в широком диапазоне областей гражданского строительства в качестве цементной добавки, а также в бетонных конструкциях.

В экспериментальном исследовании [6] комбинация керамических отходов и гранулированного доменного шлака использовалась при приготовлении однокомпонентных щелочно-активируемых связующих. В работах [7–11] доменный шлак рассматривался как потенциальный источник вторичного сырья для производства керамических изделий.

Проводятся исследования в области создания новых композиционных материалов для повышения качества дорожных покрытий. Авторами [12] исследована техническая возможность использования переработанных керамических заполнителей в качестве частичной замены природных заполнителей в асфальте горячей смеси. Экспериментально доказана возможность использования стального шлака в виде крупного заполнителя в основании дорожного полотна [13–16].

Современные требования ресурсо- и энергосбережения указывают на необходимость перевода кирпичного производства на преимущественный выпуск эффективных пористых стеновых материалов.

Проблемы в производстве эффективных теплоизоляционных стеновых материалов обусловлены недостаточной сырьевой базой. Работы [17–19] посвящены исследованию возможности улучшения прочностных характеристик керамического кирпича из легкоплавких глин с использованием природных сырьевых добавок.

На западе Казахстана имеется одно из крупнейших месторождений кремнистой породы – опоки, которое может быть использовано как основной сырьевой ресурс в производстве стеновой керамики.

Авторами [20] разработана технология производства высокопроизводительных стеновых керамических изделий со средней плотностью менее 700–800 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью менее 0,15–0,20 Вт/(м °С) при минимальных затратах.

Таким образом, разработка инновационных технологий композиционных материалов с различным функциональным назначением и повышенными эксплуатационными качествами является важной задачей современного материаловедения.

### Выбор сырьевых материалов и методы исследований

С целью изучения сырьевых материалов и разработки новых составов керамических заполнителей и теплоизоляционно-конструкционной стеновой керамики в качестве основных сырьевых компонентов исследовалась суглинок и бентонитовая глина Западно-Казахстанского месторождения, а также гранулированный доменный шлак АО «АрселорМиттал Темиртау». Отбор проб глинистого сырья, подбор методики исследования свойств производились в соответствии с ГОСТ 5180, ГОСТ 12248, ГОСТ 12536, ГОСТ 22733, ГОСТ 23161, ГОСТ 23740, ГОСТ 24143, ГОСТ 26263, ГОСТ 30416, ГОСТ 21216.

Для исследования свойств гранулированного доменного шлака использовался ГОСТ 3476.

Исследование микроструктуры керамических композиций проводилось на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV и на приборе JEM-6610LA (фирма JEOL, Япония). Аналитические исследования элементных составов проводились на рентгеновском дифрактометре X'Pert PRO (Япония).

В качестве глинистого компонента использовался лессовидный суглинок Чаганского месторождения (Западно-Казахстанская область). На рис. 1 представлены результаты исследований глины Западно-Казахстанского месторождения методом растрового электронного микроскопа (РЭМ). Элементный состав глины приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Элементный состав глины

Элемент	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Вес., %	7.99	50.94	0.64	1.41	5.47	19.40	1.66	7.58	0.28	0.08	4.54
Атомн., %	12.92	61.83	0.54	1.13	3.94	13.42	0.82	3.67	0.11	0.03	1.58

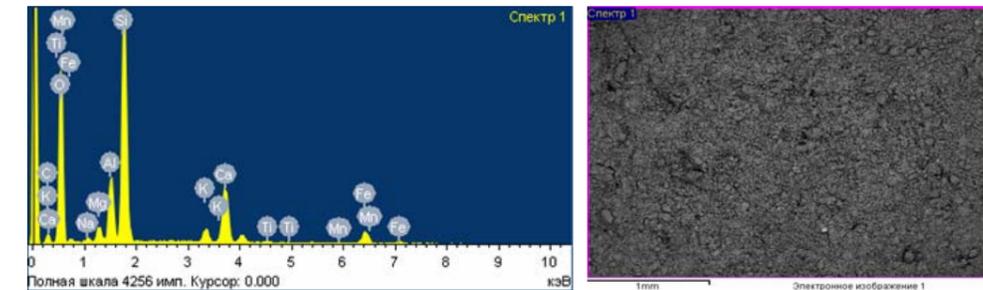


Рис. 1. Результаты исследований суглинка Западно-Казахстанского месторождения методом растрового электронного микроскопа (РЭМ)

Доменный гранулированный шлак металлургического завода АО «Алселор Миттал Темиртау» (г.Темиртау) использовали как модифицирующую добавку. Он представляет собой зернистый материал серого цвета с модулем крупности 3,9–4,1 (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Химический состав доменного гранулированного шлака

Наименование сырья	Содержание оксидов, мас. %												
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiH	п.п.
Доменный гранулированный шлак	40,62	16,24	0,19-0,52	42,11	0,43	5,33-10,39	1,66	0,36-1,5	0,42-1,32	-	0,62-0,88	0,11-1,37	0,92

Резкое охлаждение шлакового расплава в процессе грануляции обуславливает в основном его стекловидное строение. Содержание стеклофазы в них составляет 65–97 %. Закристаллизованная часть шлака в основном представлена псевдошлаком  $\alpha$ -CaO·SiO<sub>2</sub> с показателями преломления  $N_g=1,652\pm 0,0015$ ;  $N_p=1,608\pm 0,0015$ .

В естественном состоянии шлаки рентгеноаморфны.

Изучение макроструктуры доменного гранулированного шлака (рис. 2) показало, что частицы шлака в естественном виде пронизаны микро и макропорами.



Рис. 2. Макроструктура доменного гранулированного шлака

Результаты РФА образцов, содержащих различное количество гранулированного доменного шлака и обожженных при 800, 900 и 1000 °С, показывают, что при 800 °С во всех образцах основными кристаллическими фазами являются мелилит, анортит и  $\beta$ -кристобалит [21]. С увеличением температуры обжига наблюдается увеличение количества всех кристаллических фаз, о чем свидетельствует рост интенсивности дифракционных максимумов. Кроме того, наблюдаются дифракционные пики незначительной интенсивности, характерные для волластонита.

В качестве сырьевых компонентов в композиции для теплоизоляционно-конструкционного керамического кирпича были исследованы кремнистая порода-опока и бентонитовая глина Западно-Казахстанского месторождения.

В ходе исследования было выяснено, что глинистые опоки (Таскалинское месторождение) породы достаточно крепкие, светло-серого и темно-желтого цвета, который при увлажнении приобретает серовато-зеленоватый оттенок. Структура обычно массивная. По небольшим, едва намечающимся трещинкам часто наблюдается концентрация гидрооксидов железа.

По результатам анализа (рис. 4) видно, что основная опаловая масса породы буквально «пропитана» глинистым веществом. Это делает затруднительным определение коэффициента преломления основной массы. При большом увеличении видно преимущественно игольчатое и таблитчатое строение основной массы глинистых минералов. Глинистая составляющая представлена в количестве 20–50 %. Встречаются единичные органические остатки в виде спикул губок. Алевритовый материал представлен в основном неокатанными зернами кварца (до 15 %) и зернами глауконита (около 5 %) ярко-зеленого цвета. Достаточно часто наблюдаются относительно крупные (до 0,5 мм) чешуйки слюды. По микротрещинам хорошо просматривается концентрация гидрооксидов железа. Элементный состав опоки показан в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Элементный состав опоки

Элемент	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
Вес., %	53.68	0.21	0.55	3.40	36.53	0.19	1.18	1.33	0.18	2.75
Атомн., %	67.97	0.18	0.46	2.55	26.35	0.12	0.61	0.67	0.08	1.00

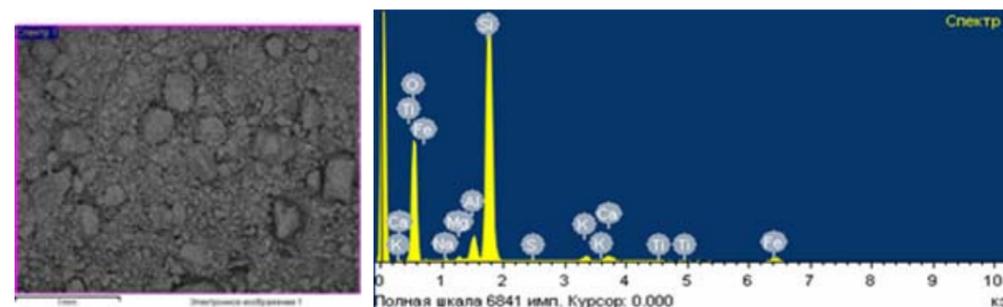


Рис. 4. Результат анализа опоки с помощью растрово-электронного микроскопа



Рис. 5. Микроструктура бентонитовой глины Западно-Казахстанского месторождения

Бентонитовая глина Западно-Казахстанского месторождения по огнеупорным свойствам относится к легкоплавким, по содержанию Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – к глинам с высоким содержанием красящих оксидов, а по содержанию Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – к группе кислого сырья (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Химический состав бентонитовой глины Западно-Казахстанского месторождения

Наименование сырья	Содержание оксидов, мас. %							п.п.п
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	
Погодаевское месторождение	61,51	17,06	2,27	3,21	6,36	1,27	3,57	6,75

Минералогический состав глины представлен в основном монтмориллонитом  $d/n=5,06; 4,46; 3,79; 3,06; 2,455; 2,28; 2,127; 1,977; 1,817; 1,675 \cdot 10^{-10}$  м.

#### Основные результаты

Область исследования компонентных составов керамического заполнителя включает следующие предельные концентрации компонентов, мас. %:

- глина Западно-Казахстанского месторождения – 70–90;
- доменный гранулированный шлак – 10–30.

Смешивание производится в двухвальном смесителе с добавлением воды с последующей формовкой гранул с размерами 5–10 мм, 10–20 мм, 20–40 мм. Высушивание ведется в сушильном шкафу при температуре 70–80 °С.

Исследования по композиционному составу теплоизоляционно-конструкционного стенового материала проводились в сырьевой системе «опока – бентонитовая суспензия».

Кремнистая порода-опока подвергалась помолу до удельной поверхности 1200–1500 см<sup>2</sup>/г. Из бентонитовой глины готовили суспензию с плотностью 1,3–1,4 г/см<sup>3</sup>. Сырьевая смесь формируется методом полусухого прессования под давлением 15–20 МПа. Отформованные изделия обжигались без предварительной сушки. В ка-

честве исследуемой области выбраны следующие предельные содержания компонентов, в мас. %:

- кремнистая порода-опока – 70–95 %;
- бентонитовая суспензия – 3–30 %.

Для исследования выбрали наиболее важные эксплуатационные характеристики керамики, формирующиеся при термообработке: прочность при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение и теплопроводность (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Физико-механические свойства образцов керамического заполнителя и теплоизоляционно-конструкционной керамики

Наименование материала	Компонентные составы, %	Температура обжига, °С	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %	Теплопроводность, Вт/мК
Керамический заполнитель	Суглинок 70-90 Шлак 10-30	1000-1100	920-1200	9,2-13,4	14,1-14,8	0,1-0,24
Теплоизоляционно-конструкционная керамика	Опока 75-97 Бентонитовая Суспензия 3-25	950-1000	850-1250	9,6-14,2	22,5-28,1	0,2-0,5

#### Заключение

1. Изучены способы утилизации доменных шлаков в производстве строительных материалов. Установлено, что доменный гранулированный шлак достаточно широко используется в строительстве. Однако мало изучена область применения его как упрочняющей структуру комплексной добавки на основе глинистых сырьевых материалов для получения качественного керамического заполнителя.

2. Проведены комплексные исследования сырьевых материалов по определению химико-минералогических составов и физико-механических свойств.

3. Установлена возможность получения эффективных и востребованных материалов в виде керамического заполнителя и теплоизоляционно-конструкционной стеновой керамики на основе разработанных композиционных составов.

4. Установлено образование структуроупрочняющих минералов керамических композиций «глина – шлак», способствующих повышению физико-механических свойств.

5. Исследовано и доказано положительное влияние добавления в состав керамической массы бентонита в виде суспензии, которое приводит к улучшению механических и теплопроводных свойств теплоизоляционно-конструкционного стенового материала.

6. Практическая реализация результатов исследования способствует утилизации доменного гранулированного шлака до 30 % и расширению сырьевой базы керамической промышленности.

#### Список литературы

1. Grubeša, Ivanka Netinger. Application of blast furnace slag in civil engineering: Worldwide studies / Ivanka Netinger Grubeša, Ivana Barišić, Aleksandra Fucic, Samitinjay S. Bansode // Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction. – 2016. – P. 51–66.
2. Aghaeipour, Arash. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability / Arash Aghaeipour, Morteza Madhkhani // Construction and Building Materials. – 15 June 2017. – Vol. 141. – P. 533–541.

3. Thi Hai Yen. Microstructure and composition of fly ash and ground granulated blast furnace slag cement pastes in 42-month cured samples / Thi Hai Yen, Nguyen Koichi, Tsuchiya Daiki Atarashi // Construction and Building Materials. – 10 December 2018. – Vol. 191. – P. 114–124.

4. Higashiyama, Hiroshi. Efficiency of ground granulated blast-furnace slag replacement in ceramic waste aggregate mortar / Hiroshi Higashiyama, Manote Sappakittipakorn, Mutsumi Mizukoshi, Osamu Takahashi // Cement and Concrete Composites. – May 2014. – Vol. 49. – P. 43–49.

5. Gulden Cagin Ulubeyli. Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes / Gulden Cagin Ulubeyli, Recep Artir // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 3 July 2015. – Vol. 195. – P. 2191–2198.

6. Abdollahnejad, Z. Fiber-reinforced one-part alkali-activated slag/ceramic binders / Z. Abdollahnejad, M. Mastali, T. Luukkonen, P. Kinnunen, M. Illikainen. // Ceramics International. – 1 June 2018. – Vol. 44, Iss. 8. – P. 8963–8976.

7. Zahide Bayer Ozturk. Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag / Zahide Bayer Ozturk, ElifEren Gultekin // Ceramics International. – November 2015. – Vol. 41, Iss. 9. – Part B. – P. 12020–12026.

8. Ilker, Ozdemir. Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag / Ilker Ozdemir, Senol Yilmaz // Journal of Materials Processing Technology. – 5 March 2007. – Vol. 183, Iss. 1. – P. 13–17.

9. Development of ceramic tiles from common clay and blast furnace slag / Syamal Ghosh, Mihir Das, S Chakrabarti, S Ghatak // Ceramics International. – 2002. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 393–400.

10. Favoni, Cristian. Ceramic processing of municipal sewage sludge (MSS) and steelworks slags (SS) / Cristian Favoni, Dino Minichelli, Franco Tubaro, Sergio Brückner, Stefano Maschio // Ceramics International. – 2005. – Vol. 31, Iss. 5. – P. 697–702.

11. Lu, Guoyang. Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder / Guoyang Lu, Pengfei Liu, Yuhong Wang, Sabine Faßbender, Markus Oeser // Journal of Cleaner Production. – 20 May 2019. – Vol. 220. – P. 1052–1060.

12. Silvestre, Ramón. Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses / Ramón Silvestre, Esther Medel, Alfredo García, José Navas // Construction and Building Materials. – August 2013. – Vol. 45. – Pages 115–122.

13. Kandhal, P.S. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures / P.S. Kandhal, G.L. Hoffman // Transp Res Rec. – 1997. – 1583. – P. 28–36.

14. Collins, R.J. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction / R.J. Collins, S.K. Ciesielski // National cooperative highway research program, synthesis of highway practice 199, TRB, Washington, DC; 2007.

15. Shaopeng, Wu. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures / Wu Shaopeng, Xue Yongjie, Ye Qunshan // Build Environ. – 2007. – 42. – P. 2580–2585.

16. Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behiry. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement / Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behiry. // Ain Shams Engineering Journal. – March 2013. – Vol. 4, Iss. 1. – P. 43–53.

17. Govorova, L.P. Influence of Stony Rocks Additives on Strengthening of Aluminosilicate Ceramics from Fusible Clays / L.P. Govorova, T.V. Vakalova, E.V. Shvagrakova, L.A. Zagaynova. // Procedia Chemistry. – 2015. – Vol. 15. – P. 120–126.

18. Hassan H.M. Darweesh. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks / Hassan H.M. Darweesh. // Ceramics International. – 2001. – Vol. 27, Iss. 1. – P. 45–50.

19. Yanık, G. Ceramic properties of kaolinized tuffaceous rocks in Kesan region, Thrace, NW Turkey / G. Yanık, F. Esenli, V. Uz, V. Esenli, T. Kūlah // Applied Clay Science. – April 2010. – Vol. 48, Iss. 3. – P. 499–505.

20. Kotlyar, V.D. Wall Ceramics Products Based on Opoka and Coal Slurry / V.D. Kotlyar, K.A. Lapunova, G.A. Kozlov // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1452–1460.

21. Монтаев, С.А. Стеновая керамика на основе композиций техногенного и природного сырья Казахстана: монография / С.А. Монтаев, Ж.Т. Сулейменов. – Алматы: ҒЫЛЫМ, 2006.

#### References

1. Grubeša, Ivanka Netinger. Application of blast furnace slag in civil engineering: Worldwide studies / Ivanka Netinger Grubeša, Ivana Barišić, Aleksandra Fucic, Samitinjay S. Bansode // *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*. – 2016. – P. 51–66.

2. Aghaeipour, Arash. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability / Arash Aghaeipour, Morteza Madhkan // *Construction and Building Materials*. – 15 June 2017. – Vol. 141. – P. 533–541.

3. Thi Hai Yen. Microstructure and composition of fly ash and ground granulated blast furnace slag cement pastes in 42-month cured samples / Thi Hai Yen, Nguyen Koichi, Tsuchiya Daiki Atarashi // *Construction and Building Materials*. – 10 December 2018. – Vol. 191. – P. 114–124.

4. Higashiyama, Hiroshi. Efficiency of ground granulated blast-furnace slag replacement in ceramic waste aggregate mortar / Hiroshi Higashiyama, Manote Sappakittipakorn, Mutsumi Mizukoshi, Osamu Takahashi // *Cement and Concrete Composites*. – May 2014. – Vol. 49. – P. 43–49.

5. Gulden Cagin Ulubeyli. Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes / Gulden Cagin Ulubeyli, Recep Artir // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 3 July 2015. – Vol. 195. – P. 2191–2198.

6. Abdollahnejad, Z. Fiber-reinforced one-part alkali-activated slag/ceramic binders / Z. Abdollahnejad, M. Mastali, T. Luukkonen, P. Kinnunen, M. Illikainen. // *Ceramics International*. – 1 June 2018. – Vol. 44, Iss. 8. – P. 8963–8976.

7. Zahide Bayer Ozturk. Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag / Zahide Bayer Ozturk, ElifEren Gultekin // *Ceramics International*. – November 2015. – Vol. 41, Iss. 9. – Part B. – P. 12020–12026.

8. Ilker, Ozdemir. Processing of unglazed ceramic tiles from blast furnace slag / Ilker Ozdemir, Senol Yilmaz // *Journal of Materials Processing Technology*. – 5 March 2007. – Vol. 183, Iss. 1. – P. 13–17.

9. Development of ceramic tiles from common clay and blast furnace slag / Syamal Ghosh, Mihir Das, S Chakrabarti, S Ghatak // *Ceramics International*. – 2002. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 393–400.

10. Favoni, Cristian. Ceramic processing of municipal sewage sludge (MSS) and steelworks slags (SS) / Cristian Favoni, Dino Minichelli, Franco Tubaro, Sergio Brückner, Stefano Maschio // *Ceramics International*. – 2005. – Vol. 31, Iss. 5. – P. 697–702.

11. Lu, Guoyang. Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder / Guoyang Lu, Pengfei Liu, Yuhong Wang, Sabine Faßbender, Markus Oeser // *Journal of Cleaner Production*. – 20 May 2019. – Vol. 220. – P. 1052–1060.

12. Silvestre, Ramón. Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses / Ramón Silvestre, Esther Medel, Alfredo García, José Navas // *Construction and Building Materials*. – August 2013. – Vol. 45. – Pages 115–122.

13. Kandhal, P.S. Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures / P.S. Kandhal, G.L. Hoffman // *Transp Res Rec*. – 1997. – 1583. – P. 28–36.

14. Collins, R.J. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction / R.J. Collins, S.K. Ciesielski // *National cooperative highway research program, synthesis of highway practice 199*, TRB, Washington, DC; 2007.

15. Shaopeng, Wu. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures / Wu Shaopeng, Xue Yongjie, Ye Qunshan // *Build Environ*. – 2007. – 42. – P. 2580–2585.

16. Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behiry. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement / Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behiry. // *Ain Shams Engineering Journal*. – March 2013. – Vol. 4, Iss. 1. – P. 43–53.

17. Govorova, L.P. Influence of Stony Rocks Additives on Strengthening of Aluminosilicate Ceramics from Fusible Clays / L.P. Govorova, T.V. Vakalova, E.V. Shvagrakova, L.A. Zagaynova. // *Procedia Chemistry*. – 2015. – Vol. 15. – P. 120–126.

18. Hassan H.M. Darweesh. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks / Hassan H.M. Darweesh. // *Ceramics International*. – 2001. – Vol. 27, Iss. 1. – P. 45–50.

19. Yanık, G. Ceramic properties of kaolinized tuffaceous rocks in Kesan region, Thrace, NW Turkey / G. Yanık, F. Esenli, V. Uz, V. Esenli, T. Kūlah // *Applied Clay Science*. – April 2010. – Vol. 48, Iss. 3. – P. 499–505.

20. Kotlyar, V.D. Wall Ceramics Products Based on Opoka and Coal Slurry / V.D. Kotlyar, K.A. Lapunova, G.A. Kozlov // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1452–1460.

21. Montaev, S.A. Wall ceramics based on compositions of technogenic and natural raw materials of Kazakhstan: monograph / S.A. Montaev, Zh.T. Suleimenov. – Almaty: Gylym, 2006.

УДК 693.95

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана  
Казахстан, 090009, Уральск,  
ул.Жангир хана, 51

**Монтаев Сарсенбек Алиакбарович**,  
доктор технических наук, профессор  
высшей школы «Строительство  
и строительные материалы»  
E-mail: montaevs@mail.ru

**Таудаева Айнур Амангалиевна**,  
докторант высшей школы «Строительство  
и строительные материалы»  
E-mail: taudaeva\_80@mail.ru

**Жарылгапов Сабит Муратович**,  
доктор PhD, старший преподаватель  
высшей школы «Строительство  
и строительные материалы»  
E-mail: sabit.raisa@mail.ru

Западно-Казахстан Agrarian-Technical  
University named after V.I. Zhangir Khana  
Kazakhstan, 090009, Uralsk, 51,  
Zhangir Khan St.

**Montaev Sarsenbek Aliakbarovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the Higher  
School «Construction and Building Materials»  
E-mail: montaevs@mail.ru

**Taudaeva Ainur Amangaliyevna**,  
Doctoral student of the higher school  
«Construction and building materials»  
E-mail: taudaeva\_80@mail.ru

**Zharylgapov Sabit Muratovich**,  
Doctor PhD, Senior Lecturer of the Higher  
School «Construction and Building Materials»  
E-mail: sabit.raisa@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИСТОЙ ПОРОДЫ-ОПОКИ

С.А. Монтаев, А.А. Таудаева, С.М. Жарылгапов

Установлены основные закономерности изменения наиболее важных физико-механических свойств нетрадиционных керамических масс в интервале температур обжига 800–1100 °С в системе «кремнистая порода-опока Таскалинского месторождения – монтмориллонитовая глина Погадаевского месторождения – зола-унос Екибастузской ГРЭС». Установлено, что с повышением температур повышаются показатели средней плотности и прочности при сжатии. При этом средняя плотность и прочность при сжатии образцов, обожженных в интервале температур 900–1100 °С, составляет 1152–1198 кг/м<sup>3</sup> и 11,5–12,4 МПа соответственно. А показатели водопоглощения находятся в пределах 35,9–38,04 %. Установлено, что образцы, обожженные в интервале температур 900–1100 °С, обладают более низкими показателями коэффициента теплопроводности (0,22–0,24 Вт/(м·°С)), чем образцы традиционных керамических масс на основе глин (более 0,46 Вт/(м·°С)).

*Ключевые слова: кремнистая порода-опока, монтмориллонитовая глина, зола-унос, керамическая масса, температура обжига, физико-механические свойства, коэффициент теплопроводности, эффективная керамика*

## THE INFLUENCE OF THE FIRING TEMPERATURE ON CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WALL CERAMICS ON SILICONY ROCK-OPOKA

S.A. Montaev, A.A. Taudaeva, S.M. Zharylgapov

The main regularities of changes in the most important physical and mechanical properties of unconventional ceramic masses in the firing temperature range of 800–1100 °С in the «system siliceous rock-flask of the Taskalinskoye deposit – montmorillonite clay of the Pogadaevskoye deposit – ash – runoff at Ekibastuz GRES» have been established. It is found that with an increase in temperatures, the indicators of average density and compressive strength increase. At the same time, the average density and compressive strength of specimens fired in the temperature range 900–1100 °

C is in the range of 1152–1198 kg / m<sup>3</sup> and 11.5–12.4 MPa, respectively. And the indicators of water absorption are in the range of 35.9–38.04 %. It is found that the specimens fired in the temperature range have lower values of thermal conductivity coefficient (0.22–0.24 W/(m·°C)) than the samples of traditional ceramic masses based on clays (more than 0.46 W / (m·°C)).

*Keywords: siliceous rock-soda, montmorillonite clay, fly ash, ceramic mass, firing temperature, physical and mechanical properties, thermal conductivity coefficient, effective ceramics*

Повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий – одна из актуальнейших задач современного строительного материаловедения. Данная задача неразрывно связана с разработкой новых составов сырьевых композиций с целью получения теплоизоляционно-конструкционных материалов, обладающих повышенными теплозащитными свойствами.

В последнее время резко возросла потребность в новых энерго- и ресурсосберегающих пористых и пустотелых керамических строительных материалах, обеспечивающих в процессе производства значительное снижение расхода сырья и энергозатрат на сушку и обжиг.

Проблема развития производства этих материалов связана с необходимостью привязки современных технологий к местному сырью, отсутствием однозначных требований к выбору сырья, научных и технологических основ их производства.

В развитых странах увеличение пористости керамических материалов позволило значительно снизить среднюю плотность материала и увеличить показатели теплопроводности на 0,14–0,18 Вт/(м·°С).

Для характеристики порового пространства в керамике наиболее часто применяют следующие понятия: общая пористость, открытая и закрытая пористость, капиллярная и проникаемая пористость, эффективная и канальная пористость, фактор лабиринта и фактор структуры, величина пор и их распределение по размерам, средний размер пор, удельная поверхность, газопроницаемость, водопроницаемость.

Из указанных характеристик важнейшими являются пористость, форма и размер пор. Размер пор в керамических материалах изменяется в широких пределах – от долей нанометров до нескольких миллиметров.

Изучению пористости посвящено значительное число исследований в различных областях науки и промышленного производства. Однако вопросы формирования пористости и её конечной структуры в изделиях строительной керамики изучены недостаточно [1, 2].

Керамические материалы и изделия класса пористой керамики должны обладать повышенной пористостью (обычно более 30 %), которую, как правило, создают преднамеренно [3]. Поры могут занимать от нуля до 90 % общего объема изделий. Из всего многообразия характеристик структуры материала одним из наиболее важных являются количественные значения показателей, характеризующих поровую структуру материала [4]. Форма пор сложна и весьма разнообразна: закрытые, открытые, проникаемые, открытые тупиковые [5].

Формирование спеченной структуры керамических материалов, определяющей их конечные физико-механические свойства, происходит на стадии обжига.

При этом процесс структурообразования и скорость основных термических процессов зависят от множества факторов. Процесс обжига керамических масс сопровождается диффузией твердых, жидких и газообразных веществ через газовые, твердые и жидкие фазы, частичным плавлением легкоплавких минералов, образованием новых кристаллических фаз за счет взаимодействия реагирующих компонентов.

В достижении необходимых температур немаловажную роль играют способы подвода теплоты, конструкции печи, физические свойства обжигаемых материалов, такие, как теплоемкость и теплопроводность, а также термические эффекты кристаллизации.

Общеизвестно, что характер изменений, претерпеваемых глинами при нагревании, определяется наличием в материале тех или иных глинистых минералов и примесей.

Фазовые превращения в глинах начинаются при температуре 600 °С. Они связаны с аморфизацией глинистого вещества. При температуре 600 °С глинистые минералы теряют кристаллизационную воду. Обожженный при температуре 800 °С и выше материал представляет собой изотропную массу, в которой встречаются отдельные стекловидные участки.

Образование новых соединений за счет взаимодействия оксидов железа с глиноземом и кремнеземом происходит при температуре обжига выше 1000 °С.

Однако при разработке новых композиционных составов с использованием нетрадиционных сырьевых ресурсов возникает объективная необходимость проведения научно-экспериментальных работ для установления основных закономерностей изменения процессов структурообразования путем исследования изменения физико-механических свойств в зависимости от температуры обжига [6–8].

**Цель исследования:** изучение влияния температуры обжига на физико-механические свойства керамической композиции в системе «кремнистая порода-опока – монтмориллонитовая глина – зола-унос» с целью получения эффективной стеновой керамики.

#### Материалы и методы исследования

На начальном этапе были проведены исследования по изучению физико-механических свойств и химико-минералогических характеристик выбранных сырьевых материалов. Ниже приводятся результаты проведенных исследований.

Комплекс исследований по определению химико-минералогического состава изучаемых сырьевых материалов проводился в Южно-Казахстанском государственном университете имени М. Ауэзова (г. Шымкент). Для определения локального элементного состава образцов опоки был использован метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) марки JSM-6390LV с энерго-дисперсионным микроанализом, для определения химического элементного состава был использован метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой марки ICP-MS Agilent 7500сх. Для определения минералогического состава был использован метод рентгеновской дифрактометрии марки X'Pert PRO MPD.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводился с помощью специального аппарата ДРОН-3.

Для проведения научно-экспериментальных работ в качестве сырьевых материалов использованы кремнистые породы-опоки Таскалинского месторождения, монтмориллонитовая глина Погадаевского месторождения и зола-унос Экибастузкой ГРЭС.

По результатам рентгенофазового анализа (рис. 1) установлено, что минералогический состав глины представлен в основном монтмориллонитом  $d/n=5,06; 4,46; 3,79; 3,06; 2,45; 2,28; 2,12; 1,97; 1,81; 1,67 \text{ \AA}$ . Кроме того, в составе глины присутствует кварц ( $\text{SiO}_2$ )  $d/n=4,24; 3,34; 2,45; 2,28; 2,12; 1,98; 1,81; 1,66; 1,33 \text{ \AA}$ , гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  $d/n=2,69; 1,83; 1,68; 1,59 \text{ \AA}$  и гидрослюда  $d/n=3,21; 2,57; 2,12; 1,49 \text{ \AA}$ .

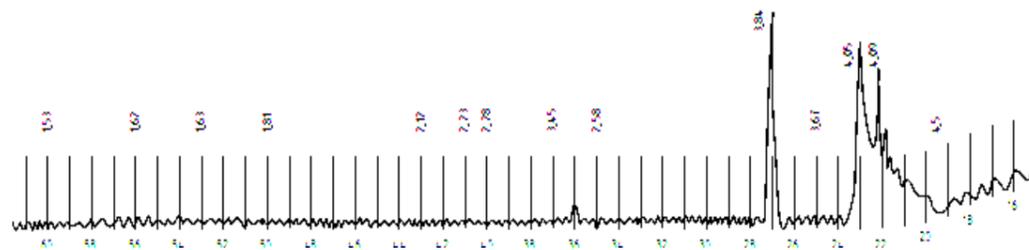


Рис. 1. Рентгенограмма кремнистой породы-опоки Таскалинского месторождения

Кремнистая порода-опока Таскалинского месторождения представляет собой легкую твердую микропористую горную породу. Согласно геологическим данным опоки залегают в палеогеновых и меловых отложениях, образуются в морских бассейнах за счет уплотнения и цементации диатомитов и трепелов, представляет собой белые, серые или зеленоватые легкие породы с редкими остатками диатомовых водорослей, радиолярий и спикул губок. Их плотность составляет 1,3–1,5 г/см<sup>3</sup>.

По результатам рентгенофазового анализа (см. рис. 1) установлено, что в качестве основного минерала присутствует аморфный кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ).

Зола-унос Экибастузкой ГРЭС представляет собой рыхлый порошкообразный материал черно-серого цвета и обладает следующими физико-механическими свойствами золы: удельная поверхность 3200–3700 см<sup>2</sup>/г, истинная плотность 1,75–1,84 г/см<sup>3</sup>, насыпная плотность 675–740 кг/м<sup>3</sup>.

Гранулометрический состав золы, %, при размере частиц, мм: более 0,25 – 5,98 %; 0,25–0,05 – 34,8 %; 0,05–0,01 – 43,07 %; 0,01–0,005 – 6,55 %; 0,005–0,001 – 6,40 %; менее 0,001 – 4,35 %.

В таблице представлены результаты определения кристаллических фаз в золе.

Минеральный состав золы уноса Экибастузкой ГРЭС

Наименование образца	Название кристаллических фаз	Химическая формула
Зола унос	Quartz alpha, alpha-Si O <sub>2</sub> ;	SiO <sub>2</sub> Al <sub>4,44</sub> Si <sub>1,56</sub> O <sub>9,78</sub>
Экибастузской ГРЭС	Mullite, syn	

Для проведения научно-экспериментальных работ сырьевые материалы сначала сушились в сушильном шкафу при температуре 90–100 °С до остаточной влажности 5–7 %. Затем кремнистая порода-опока и монтмориллонитовая глина подвергались предварительному измельчению с помощью лабораторной щековой дробилки до получения фракции 10–25 мм. После измельчения оба сырья подвергались помолу в лабораторной шаровой мельнице до полного прохождения через сито 1,0 мм. Зола-унос Экибастузкой ГРЭС использовалась без измельчения из-за ее высокой дисперсности.

Исследованию подвергались керамическая смесь следующего состава, мас. %: кремнистая порода-опока – 80, зола-унос – 10, монтмориллонитовая глина – 10.

Компоненты керамической смеси взвешивались с помощью электронных весов, высыпались в сферическую чашу и насухо перемешивались до получения гомогенной смеси. Затем в смесь добавлялась вода в количестве 10–12 % от массы сухих компонентов. Затем керамическая смесь тщательно перемешивалась до получения однородной влажной смеси. Из полученной керамической массы формовались образцы-цилиндры размером 50×50×50 мм методом полусухого прессования. Давление прессования составляло 15 МПа. Отформованные образцы обжигались в электрической муфельной печи без предварительной сушки со скоростью подъема температур 80 °С в час. Образцы обжигались при температурах 800, 900, 1000 и 1100 °С. При каждой температуре образцы выдерживались в течение одного часа. Остывание обожженных образцов осуществлялось при отключенной печи до комнатной температуры. После обжига образцы подвергались испытанию по определению наиболее важных физико-механических свойств керамики, таких, как средняя плотность кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии, МПа, водопоглощение, % и теплопроводность, Вт/(м °С). Результаты проведенных научно-экспериментальных работ приведены на рис. 2–5.

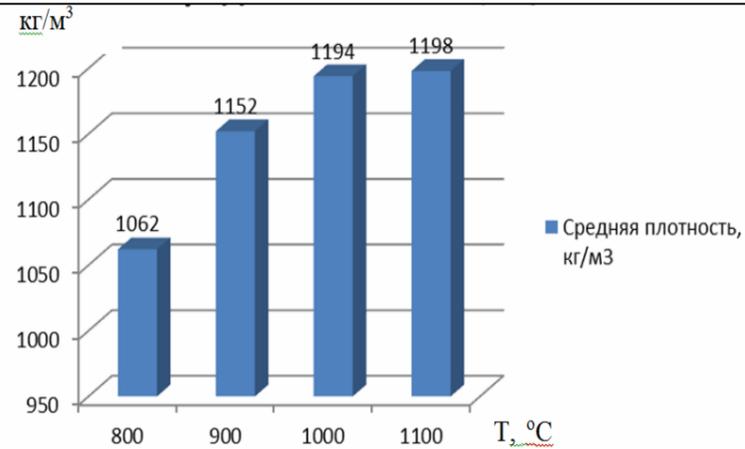


Рис. 2. Зависимость средней плотности (кг/м<sup>3</sup>) керамической композиции в интервале температур обжига 800–1100°C

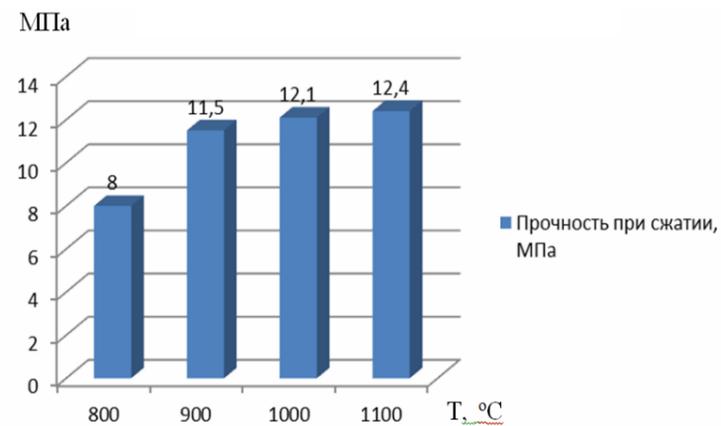


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии (МПа) керамической композиции в интервале температур обжига 800–1100°C

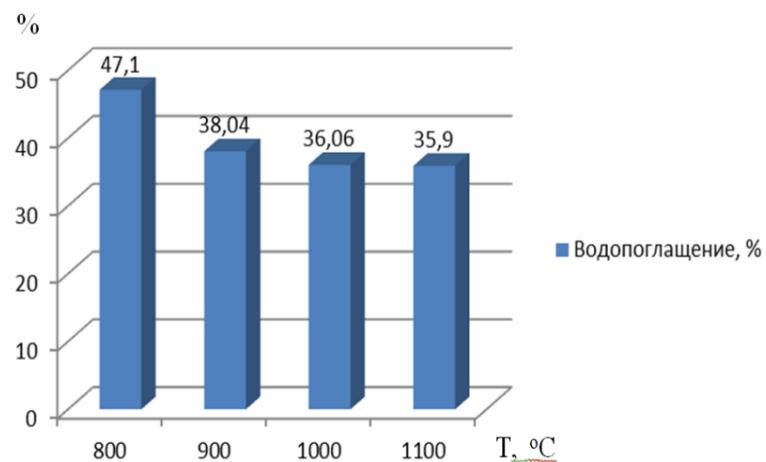


Рис. 4. Зависимость водопоглощения (%) керамической композиции в интервале температур обжига 800–1100°C

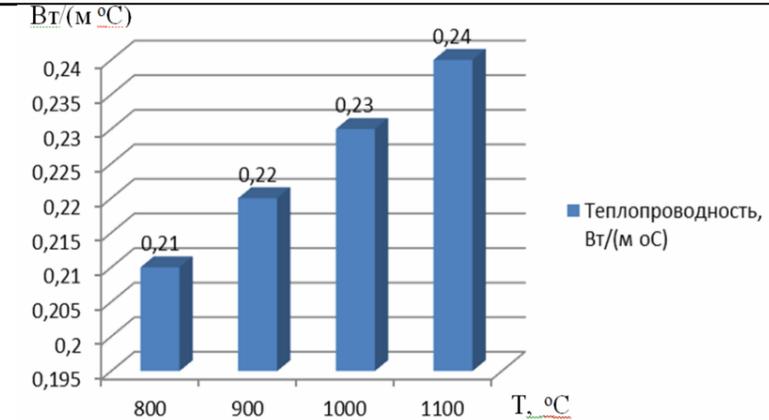


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности керамической композиции в интервале температур обжига 800–1100 °С

### Результаты и обсуждения

Как показывают результаты научно-экспериментальных работ, при температуре в интервале 800–1100 °С средняя плотность образцов постепенно возрастает от 1062 до 1198 кг/м<sup>3</sup>.

Также наблюдается рост прочности при сжатии с повышением температур обжига от 800 до 1100 °С. Повышение составляет от 8,0 до 12,4 МПа. Что касается изменения показателей водопоглощения в интервале температур 800–1100 °С, то наблюдается постепенное их снижения от 47,1 до 36,06 %. При этом следует отметить, что показатели водопоглощения керамических образцов на основе кремнистых пород-опок значительно выше, чем у традиционных керамических масс на основе глин. У обычных керамических масс на основе глин при максимальной температуре обжига 950–1000 °С показатели водопоглощения составляют 25–30 %.

Особый интерес представляет анализ изменения показателей коэффициента теплопроводности керамических образцов в интервале температуры обжига 800–1100 °С.

Несмотря на повышения температуры обжига, изменения коэффициента теплопроводности керамических образцов незначительны и составляют от 0,21 до 0,24 Вт/(м·°С).

Происходящие процессы объясняются тем, что модифицирующая добавка в виде монтмориллонитовой глины способствует процессу спекания керамической массы, а зола-унос способствует образованию пористой структуры за счет выгорания несгоревших остатков угля. Кремнистая порода-опока как основной компонент керамической массы обеспечивает легкость и пористость за счет своей естественной природы. В результате керамические образцы, обожженные в интервале температур 900–1100 °С, представляют с собой спеченный микропористый черепок, обладающий низкими показателями средней плотности, коэффициента теплопроводности и удовлетворительными показателями прочности при сжатии и водопоглощении.

### Выводы

Установлены основные закономерности изменения наиболее важных физико-механических свойств нетрадиционных керамических масс в интервале температур обжига 800–1100 °С в системе «кремнистая порода-опока Таскалинского месторождения – монтмориллонитовая глина Погадаевского месторождения – зола-унос Екибастузкой ГРЭС». Установлено, что с повышением температур повышаются показатели средней плотности и прочности при сжатии. При этом средняя плотность и прочность при сжатии образцов, обожженных в интервале температур 900–1100 °С, составляет 1152–1198 кг/м<sup>3</sup> и 11,5–12,4 МПа соответственно. А показатели водопоглощения находятся в пределах 35,9–38,04 %. Установлено, что образцы, обожженные в интервале температур 900–1100 °С, обладают более низкими показателями коэффициента теплопроводности (0,22–0,24 Вт/(м·°С)), чем образцы традиционных керамических масс на основе глин (более 0,46 Вт/(м·°С)).

Согласно ГОСТ 530-2007 «Кирпич и камень керамические. Общие условия» теплотехнические характеристики изделий оцениваются по коэффициенту теплопроводности в сухом состоянии  $\lambda$  Вт/(м·°С): до 0,20 – высокой эффективности; от 0,20 до 0,24 – повышенной эффективности; от 0,24 до 0,36 – эффективные; от 0,36 до 0,46 – группа условно-эффективные; свыше 0,46 – малоэффективные (обычные).

Как показывают результаты проведенных научно-экспериментальных исследований, по теплотехническим характеристикам керамические образцы исследуемого состава можно отнести к группе изделий повышенной эффективности.

#### Список литературы

1. Абдрахимов, В.З. Взаимосвязь пористо-капиллярной структуры и морозостойкости керамических материалов / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова, М.П. Зеллинг // *Материаловедение*. – 2005. – №6. – С. 19–24.
2. Абдрахимова, Е.С. Влияние усадочных напряжений при формировании водонепроницаемой структуры кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2004. – №10. – С. 29–31.
3. Гузман, И.Я. Химическая технология керамики / И.Я. Гузман. – М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. – 496 с.
4. Сенина, М.О. Пористый керамический материал со слоистой структурой / М.О. Сенина, А.И. Захарова // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2014. – Т. 23, №8. – С. 80–82.
5. Абдрахимова, Е.С. Влияние топливосодержащих отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала / Е.С. Абдрахимова, И.Ю. Рощупкина, В.З. Абдрахимов, А.К. Кайракбаев, А.В. Колпаков // *Строительные материалы и технологии*. – 2018. – №2 (76). – С. 113–120.
6. Сулейменов, С.Т. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах и минеральных отходов промышленности / С.Т. Сулейменов. – М.: Моноскрипт, 1996. – 298 с.
7. Сайбулатов, С.Ж. Исследование влияния состава зол на фазовые превращения в золокерамики / С.Ж. Сайбулатов // *Комплексное использование минерального сырья*. – 1985. – №11. – С. 78–81.
8. Самусева, М.Н. Золошлаковые материалы – альтернатива природным материалам / М.Н. Самусеева, Т.И. Шишелова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2009. – № 2. – С. 24–28.

#### References

1. Abdrakhimov, V.Z. The relationship of porous-capillary structure and frost resistance of ceramic materials / V.Z. Abdrakhimov, E.S. Abdrakhimova, M.P. Zeling // *Materials Science*. – 2005. – №6. – P. 19–24.
2. Abdrakhimova, E.S. Influence of shrinkage stresses in the formation of a waterproof structure of acid-resistant materials / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // *Refractories and technical ceramics*. – 2004. – №10. – P. 29–31.
3. Guzman, I.Ya. Chemical technology of ceramics / I.Ya. Guzman. – M.: OOO RIF «Stroymaterialy», 2003. – 496 p.
4. Senina, M.O. Porous ceramic material with a layered structure / M.O. Senin, A.I. Zakharova // *Advances in chemistry and chemical technology*. – 2014. – Vol. 23, No. 8. – P. 80–82.
5. Abdrakhimova, E.S. Influence of fuel-containing waste on the porosity structure of heat-insulating material / E.S. Abdrakhimova, I.Yu. Roshchupkina, V.Z. Abdrakhimov, A.K. Kairakbaev, A.V. Kolpakov // *Building materials and technology*. – 2018. – No. 2 (76) – P. 113–120.
6. Suleimenov, S.T. Physicochemical processes of structure formation in building materials and mineral waste industries / S.T. Suleimenov. – M.: Monuscript, 1996. – 298 p.

7. Saybulatov, S.Zh. Investigation of the influence of ash composition on phase transformations in ash ceramics / S.Zh. Saybulatov // *Complex use of mineral raw materials*. – 1985. – No. 11. – P. 78–81.

8. Samuseva, M.N. Ash and slag materials – an alternative to natural materials / M.N. Samuseeva, T.I. Shishelova // *Modern problems of science and education*. – 2009. – No. 2. – P. 24–28.

УДК 666.97.017:53

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  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ochkina.natalya@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

**Ochkina Natalya Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ochkina.natalya@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Н.А. Очкина

Приведены результаты исследования влияния основных рецептурных факторов (степени наполнения и вида модифицирующей добавки) на условно-мгновенный модуль упругости при статическом нагружении и динамический модуль упругости композитов на основе высокоглиноземистого цемента (ВГЦ) с высокоплотным наполнителем (полиминеральный отход стекольной промышленности (ПМО)).

Исходя из реологических, физико-механических и деформативных свойств, определен оптимальный состав композита с добавкой 1 % карбамидной смолы.

*Ключевые слова:* композит, высокоплотный наполнитель, ВГЦ, степень наполнения модифицирующие добавки, условно мгновенный модуль упругости при статическом нагружении, динамический модуль упругости, призмная прочность, логарифмический декремент затухания

## INFLUENCE OF PRESCRIPTION FACTORS ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF HIGH-DENSITY COMPOSITES

N.A. Ochkina

The influence of the main prescription factors (the degree of filling and the type of modifying additive) on the conditionally instantaneous modulus of elasticity under static loading and the dynamic modulus of elasticity of composites on high-alumina cement (VHC) with a high-density filler (polymineral waste of the glass industry (PMO)) has been investigated.

Based on the rheological, physical-mechanical and deformative properties, the optimal composition of the composite with the addition of 1 % carbamide resin is determined.

*Keywords:* composite, high-density filler, VHC, degree of filling, modifying additives, conditionally instantaneous modulus of elasticity under static loading, dynamic modulus of elasticity, prism strength, logarithmic damping decrement

Основными деформативными характеристиками композиционных материалов являются: модуль упругости  $E$ , коэффициент поперечных деформаций  $\mu$ , предельные деформации и параметрические уровни границ микротрещинообразования.

Всесторонние исследования деформативных свойств композитов с наполнителем из ПМО на различных вяжущих при кратковременном нагружении представлены трудами А.П. Прошина [1], Е.В. Королева [2], А.Н. Гришиной [3] и др.

Прошин А.П. [1] и Королев Е.В. [2] приводят экспериментальные данные, показывающие связь деформативных свойств композитов с их структурой. При этом структура композитов рассматривается как двухкомпонентная система, в которой матрицей (упругим каркасом) является затвердевшее вяжущее, а включениями – зерна наполнителя и наполнителя.

В трудах Е.В. Королева [1], Ю.М. Баженова [4], показано, что модуль упругости, или начальный модуль деформации, композита зависит от его состава, возраста, свойств вяжущего, наполнителя и других факторов, то есть определяется совокупными свойствами матрицы и наполнителя.

При прочих равных условиях деформативные характеристики зависят также от влажностного состояния композита, режимов формования и уплотнения. Кроме того, изменение структуры и свойств композитов при деформировании происходит в зависимости от величины, скорости и периодичности механического воздействия, а также температуры окружающей среды [5].

В работах [1–5] показано существование связи между деформативными, прочностными и эксплуатационными характеристиками композитов, приведены общие факторы, влияющие на эти показатели (природа и дисперсность наполнителя, степень наполнения и т.д.)

Нами было проведено исследование влияния степени наполнения и вида модифицирующей добавки на условно-мгновенный модуль упругости при статическом нагружении и динамический модуль упругости высокоплотных композитов на основе ВГЦ.

Исследования проводили на образцах-призмах размерами 4×4×16 см в возрасте 28 суток. Значения динамического модуля упругости  $E_{дин}$  определяли двумя способами: на ультразвуковой установке УК-10 ПМС и резонансным методом на приборе ИЧМК-2. Условно-мгновенный модуль упругости  $E_p$  определяли по ГОСТ 24452-80 «Бетоны.

Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». В соответствии с принятой методикой призмная прочность и условно-мгновенный модуль упругости композитов определяли путем последовательного ступенчатого нагружения призм по  $0,1\sigma$  ожидаемой разрушающей нагрузки без разгрузки и выдержки на каждой ступени. Общее время нагружения составляло примерно 10 минут. Для измерения деформаций использовали электротензодатчики, подключаемые к автоматическому измерителю деформаций АИД-2. Продольные датчики наклеивали на все четыре грани призмы, поперечные – на две противоположные грани.

Упругие характеристики (статический и динамический модули упругости) были выбраны для оценки деформативных свойств композитов по следующим соображениям: условно-мгновенный модуль упругости характеризует упругие деформации материала, развивающиеся практически по линейному закону при достаточно быстром (мгновенном) нагружении; по величине  $E_p$  судят о влиянии на структуру материала его состава, возраста и свойств содержащихся в нем компонентов, а также технологических факторов.

Динамический модуль упругости зависит от скорости прохождения ультразвукового импульса через упругую среду материала (чем больше плотность и однородность материала, тем выше значение  $E_{дин}$ ), а также от частоты возбужденных в образцах колебаний, при которой возникает резонанс. Этот показатель также позволяет оценить качество сформированной структуры композита и влияние на нее различных рецептурно-технологических факторов.

Рецептура исследуемых составов, а также их реологические и физико-механические свойства приведены в табл. 1.

Результаты кратковременных статических испытаний композитов представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при возрастании степени наполнения композитов до значения  $\vartheta_f = 0,59$  (Ц:Н = 1:6) происходит увеличение  $E_p$ , который сохраняет свое достаточно высокое значение и для состава со степенью наполнения  $\vartheta_f = 0,63$  (Ц:Н = 1:7). Толщина прослойки цементного камня между зернами наполнителя у таких композитов приближается к своему оптимальному значению. Это свидетельствует о формировании однородных и бездефектных структур. При дальнейшем увеличении степени наполнения вследствие дефицита связующего наблюдается закономерное появление в структуре композита микропустот (при данной технологии производства) и снижение его прочности и статического модуля упругости.

Таблица 1

Рецептура и основные свойства исследуемых композитов

№ состава	Расход компонентов, кг/м <sup>3</sup>			В Ц	Расплав конуса, мм	Плотность композита, кг/м <sup>3</sup>	Прочность* композита, МПа
	цемент	ПМО	вода				
1	554,6	2773,2	277,3	0,5	178	3947,4	63,8
2	500,2	3001,7	250,1	0,5	170	4013,1	69,9
3	455,5	3188,3	277,8	0,5	123	4029,2	65,0
4	418,3	3346,7	208,3	0,5	118	4044,9	53,6
5	386,5	3478,5	193,3	0,5	109	3826,2	36,7
6	359,2	3591,7	179,7	0,5	106	3799,7	18,9

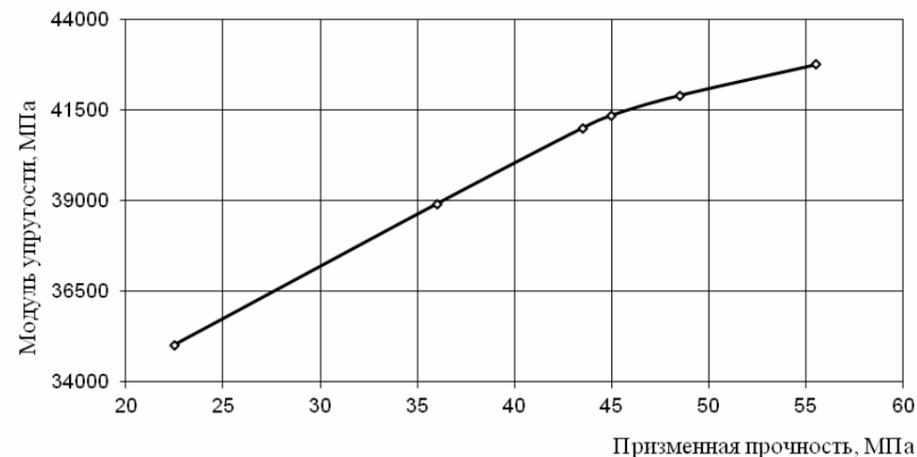
Примечание: \* – прочность композита в возрасте 28 сут.

Таблица 2

Деформативные свойства композитов  
на основе ВГЦ при статическом нагружении

№ состава	Призменная прочность композита, МПа	$\frac{R_{пр}}{R_k}$	Модуль упругости, МПа	$\mu$	$\varepsilon_1 \cdot 10^5$	$\varepsilon_2 \cdot 10^5$	Значение уровней параметрических точек	
							$\frac{R_T^0}{R_{пр}}$	$\frac{R_T}{R_{пр}}$
1	45,23	0,71	41300	0,214	130	31	0,48	0,85
2	55,43	0,79	42800	0,206	146	41	0,54	0,89
3	48,43	0,74	41800	0,211	137	33	0,51	0,86
4	43,75	0,82	41100	0,216	124	28	0,45	0,84
5	35,93	0,78	38400	0,223	97	24	0,42	0,77
6	22,81	0,72	35100	0,241	64	16	0,38	0,69

Результаты исследования подтверждают также классическую модель изменения модуля упругости композиционного материала с ростом его призменной прочности (см. рисунок).



Зависимость модуля упругости композитов от призменной прочности

Изменение модуля упругости в зависимости от степени наполнения (и, как следствие, изменения призменной прочности) композита согласуется с ранее полученными результатами для высокопрочных бетонов и растворов [6, 7] и выражением для начального модуля упругости бетона, предложенным в работе [8]:

$$E_0 = k \left[ (1 - q_3) E_{ц.к} + q_3 E_3 \right] + (1 - k) \left[ \frac{1 - q_3}{E_{ц.к}} + \frac{q_3}{E_3} \right],$$

где  $k$  – параметр, учитывающий характер распределения внутренних усилий в бетоне между цементным камнем и заполнителями, изменяющийся в зависимости от соотношения модулей упругости матрицы и наполняющих ее частиц от 0 до 1;  $q_3$  – объем заполнителей в единице объема бетона;  $E_{ц.к}$  – модуль упругости цементного камня;  $E_3$  – средний модуль упругости заполнителя.

Поведение бетонов, модифицированных добавками при статическом и динамическом нагружении, описано в трудах Н.И. Макридина, И.Н. Максимовой [9], В.И. Соломатова, М.К. Тахирова [10] и др.

При этом полученные различными авторами сведения о влиянии модифицирующих добавок на модуль упругости бетонов носят противоречивый характер. Например, одни исследователи [9] утверждают, что модуль упругости бетона с добавкой ЛСТ увеличивается, другие указывают, что ЛСТ способствует понижению модуля упругости бетона [10]. Снижение модуля упругости бетона, по мнению авторов [10], объясняется механизмом действия ЛСТ, а именно замедлением процесса гидратации и твердения в начальные сроки и воздухововлечением.

В работе [10] также обобщены имеющиеся данные о влиянии суперпластификаторов на деформативные свойства цементных бетонов. Авторы считают, что при неизменном составе бетонной смеси и водоцементном отношении введение в бетон суперпластификатора типа С-3 не оказывает существенного влияния на такие характеристики бетона, как параметрические точки микротрещинообразования, коэффициент поперечных деформаций и практически не приводит к изменению модуля упругости бетона даже при сильном разжижении смеси (при ОК = 19 см).

По мнению японских исследователей [11], основные преимущества суперпластификаторов проявляются, когда при их использовании снижается количество воды затворения при повышении или сохранении удобоукладываемости смеси. В связи с этим в большинстве имеющихся публикаций по применению суперпластификаторов описаны главным образом высокопрочные бетоны. Исследования, проведенные А.А. Борисовым и Д.В. Калашниковым [6, 7], показывают, что введение в высокопрочные бетоны дисперсного наполнителя с суперпластификатором С-3 позволяет повысить модуль упругости бетона на 20...25 %.

Исследование влияния добавок на деформативные свойства высокоплотных композитов на основе ВГЦ проводили на составах, приведенных в табл. 3.

Таблица 3

Рецептура и основные свойства модифицированных композитов

№ состава	Вид добавки	Дозировка добавки (в % от массы цемента)	В Ц	Расплав конуса, мм	Плотность композита, кг/м <sup>3</sup>	Прочность* композита, МПа
1	–	–	0,5	118	4044,9	53,57
2	Карбамидная смола	1	0,47	118	4089,1	58,78
3	ССК	0,2	0,45	118	4098,1	64,94
4	ЛСТ	0,15	0,45	118	4093,6	56,11
5	С-3	0,5	0,43	118	4126,3	62,09
6	Лимонная кислота	0,1	0,45	118	4114,0	67,22

Примечание: \* – прочность композита в возрасте 28 сут.

Деформативные свойства модифицированных композитов при ступенчатом статическом нагружении приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Деформативные свойства модифицированных композитов при статическом нагружении

№ состава	Призменная прочность композита, МПа	$\frac{R_{пр}}{R_k}$	Модуль упругости, МПа	$\mu$	$\varepsilon_1 \cdot 10^5$	$\varepsilon_2 \cdot 10^5$	Значение уровней параметрических точек микротрещинообразования	
							$\frac{R_T^0}{R_{пр}}$	$\frac{R_T}{R_{пр}}$
1	43,75	0,82	41100	0,216	124	28	0,45	0,84
2	51,87	0,88	42300	0,197	186	72	0,61	0,93
3	51,31	0,79	42000	0,202	126	31	0,47	0,90
4	46,20	0,82	41700	0,210	115	27	0,48	0,89
5	52,25	0,84	42900	0,189	138	37	0,57	0,91
6	50,19	0,75	41900	0,206	121	26	0,48	0,90

Как видно из табл. 4, все применяемые добавки положительно влияют на изменение деформативных свойств композитов. Коэффициент призменной прочности, модуль упругости и параметрические уровни микротрещинообразования смещаются в сторону больших значений. Так, например, при одинаковой подвижности растворяемых смесей призменная прочность композита с добавкой карбамидной смолы увеличивается на 18,6 %, а верхняя и нижняя границы микротрещинообразования – на 10,7 % и 35,6 % соответственно.

Кроме того, добавка карбамидной смолы увеличивает предельную поперечную деформацию композита в 2,57 раза, что свидетельствует о повышенной растяжимости его под нагрузкой. Это можно объяснить тем, что введение карбамидной смолы, отверждаемой в процессе гидратационного твердения цемента, увеличивает эластические свойства композита.

Добавка суперпластификатора С-3 позволяет повысить призменную прочность композита на 19,4 %. Введение суперпластификатора сказывается не только на величине модуля упругости, но и ведет к изменению самого процесса деформирования композита в направлении повышения упругости. Данные испытаний показывают, что первые пластические деформации зафиксированы на уровне нагружения  $\sigma = 0,409R_{пр}$  для модифицированного композита, в то время как для состава без добавки этот уровень оказался значительно ниже и составил  $\sigma = 0,318R_{пр}$ . О более упругой деформации модифицированного состава с добавкой С-3 свидетельствует незначительное изменение модуля деформации с  $4,29 \cdot 10^4$  МПа до  $4,267 \cdot 10^4$  МПа (на 0,55 %) вплоть до уровня нагружения  $\sigma = 0,72R_{пр}$ . На диаграмме деформирования немодифицированного композита наблюдается снижение модуля деформации на более ранних ступенях нагружения при  $\sigma = 0,57R_{пр}$ . Из приведенных в табл. 4 данных видно, что  $R_T^0$  и  $R_T$  для композитов, модифицированных С-3, в среднем на 26,7 % и 8,3 % выше, чем для состава без добавки, что свидетельствует о накоплении пластических деформаций.

Микротрещинообразование для модифицированных композитов начинается при напряжениях  $R_T^0 = (0,47 \dots 0,61)R_{пр}$  и заканчивается при  $R_T = (0,87 \dots 0,93)R_{пр}$ . Для немодифицированного состава эти границы соответствуют  $R_T^0 = 0,45R_{пр}$  и  $R_T = 0,84R_{пр}$ . Наиболее высокими границами образования микротрещин характеризуется композит с добавкой карбамидной смолы.

У всех составов без добавок характер разрушения типично хрупкий. Разрушение образцов под действием кратковременной возрастающей статической нагрузки происходит при напряжениях, близких к разрушающим, и начинается с возникновения преимущественно одной быстрорастущей вертикальной трещины. Введение в состав образцов полимерных добавок обеспечивает образование в цементном камне мягких демпфирующих прослоек, вызывающих ветвление образующихся трещин, что согласуется с результатами экспериментальных исследований, изложенными в работе [11].

Испытание композитов при динамическом нагружении позволило определить величину динамического модуля упругости. В табл. 5 представлена кинетика изменения динамического модуля упругости во времени.

Т а б л и ц а 5

Деформативные свойства композитов при динамическом нагружении

№ состава	Вид добавки	Дозировка добавки (в % от массы цемента)	Динамический модуль упругости, МПа				
			3 сут	7 сут	14 сут	28 сут	56 сут
1	–	–	39620	40170	41270	42300	42320
2	Карбамидная смола	1	39240	42030	42260	42510	43420
3	ССК	0,2	34660	37310	41310	41900	42870
4	ЛСТ	0,15	35170	38930	39700	42350	42500
5	С-3	0,5	34030	39910	42090	43930	44090
6	Лимонная кислота	0,1	32630	34790	38640	42440	43180

Как видно из табл. 5, введение модифицирующих добавок способствует некоторому повышению динамического модуля упругости композитов, выдержанных в течение 56 сут.

В табл. 6 приведены значения динамического модуля упругости композитов через 56 сут, определенного двумя методами: ультразвуковым и резонансным.

Т а б л и ц а 6

Динамический модуль упругости композитов при динамическом нагружении

№ состава	Вид добавки	Динамический модуль упругости в возрасте 56 сут		Логарифмический декремент затухания
		ультразвуковой метод	резонансный метод	
1	–	42320	42070	0,0101
2	Карбамидная смола	43420	42980	0,0163
3	ССК	42870	42470	0,0136
4	ЛСТ	42500	42330	0,0115
5	С-3	44090	43850	0,0079
6	Лимонная кислота	43180	42740	0,0113

Из табл. 6 видно, что величина динамического модуля упругости, определенного ультразвуковым методом, больше аналогичной величины, определенной резонансным методом.

Логарифмический декремент затухания у композита с карбамидной смолой в 1,62 раза выше, чем у состава без добавки, в 2,06 раза выше, чем у состава с добавкой суперпластификатора С-3, и в 20,38 раз выше, чем у стали ( $\delta_{стали} = 0,0008$ ). Это свидетельствует о высокой демпфирующей способности указанного композита.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить влияние основных рецептурных факторов на деформативные свойства высокоплотных композитов, изготовленных на основе ВГЦ, и установить взаимосвязь между изменениями в структуре материала и поведением его под нагрузкой.

#### Список литературы

1. Прошин, А.П. Строительные растворы и бетоны для защиты от радиации / А.П. Прошин, Е.В. Королев, В.С. Демьянова, П.Г. Комохов. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 289 с.
2. Королев, Е.В. Радиационно-защитные композиты вариатропно-каркасной структуры на основе расплавов / Е.В. Королев, А.П. Самошин, О.В. Королёва, В.А. Смирнов. – Пенза: ПГУАС, 2010. – 242 с.
3. Гришина, А.Н. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения: монография / Е.В. Королев; Моск. гос. строит. ун-т; А.Н. Гришина. – 2-е изд. (эл.). – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2017. – 225 с.
4. Баженов, Ю.М. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов, Е.В. Королев. – Пенза, Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. – 364 с.
5. Данилов А.М. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – М.: МГСУ, 2012. – 432 с.
6. Борисов, А.А. Высокопрочные бетоны на рядовых цементах с суперпластификатором на дисперсных носителях: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Борисов. – Пенза, 1997. – 182 с.
7. Калашников, Д.В. Особо тяжелый высокопрочный бетон: дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Калашников. – Пенза, 2001. – 185 с.
8. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 331 с.
9. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова. – Москва: Изд-во МГСУ, 2013. – 152 с.
10. Соломатов, В.И. Интенсивная технология бетонов / В.И. Соломатов, М.К. Тохиров, Мд. Тахер ШАХ. – М.: Стройиздат, 1989. – 270 с.
11. Eisaburo, O. Effekt of  $\gamma$  – ray Irradiation on superplasticiser and superplasticised concretes / O. Eisaburo, T. Yukio, M., Tatsuya H. Yukihiko // Review 37 Jer. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. Tokyo. May 1983. P. 98–100.
12. Комохов, П.Г. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона: монография / П.Г. Комохов, В.П. Попов. – Самара: Изд-во Самарского филиала секции «Строительство» РИА, 2003. – 152 с.

#### References

1. Proshin, A.P. Building solutions and concrete for protection against radiation / A.P. Proshin, E.V. Korolev, V.S. Demyanov, P.G. Komokhov. – Penza: PGUAS, 2005. – 289 p.
2. Korolev, E.V. Radiation-protective composites of variatropic-frame structure based on melts / E.V. Korolev, A.P. Samoshin, O.V. Koroleva, V.A. Smirnov. – Penza: PGUAS, 2010. – 242 p.
3. Grishina, A.N. Liquid glass building materials for special purposes: monograph / E.V. Korolev; Moscow state builds. un-t; A.N. Grishina. – 2nd ed. (email). – M.: Publishing house MISI-MGSU, 2017. – 225 p.

4. Bazhenov, Yu.M. Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials / Yu.M. Bazhenov, A.I. Albakasov, E.V. Korolev. – Penza, Orenburg: IPK OSU, 2010. – 364 p.
5. Danilov, A.M. Systems analysis in construction materials science: monograph / Yu.M. Bazhenov, I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev; Mw Education and Science Ross. Federation, FGBOU VPO «Mosk. state builds un-t. – M.: MGSU, 2012. – 432 p.
6. Borisov, A.A. High-strength concretes on ordinary cements with a superplasticizer on dispersed carriers: dis. ... cand. of sciences / A.A. Borisov. – Penza, 1997. – 182 p.
7. Kalashnikov, D.V. Particularly heavy high-strength concrete: dis. ... cand. of sciences / D.V. Kalashnikov. – Penza, 2001. – 185 p.
8. Sheikin, A.E. Structure and properties of cement concrete / A.E. Sheikin, Yu.V. Chekhovskiy, M.I. Brusser. – M.: Stroyizdat, 1979. – 331 p.
9. Makridin, N.I. Structural formation and structural strength of cement composites / N.I. Makridin, E.V. Korolev, I.N. Maksimova. – M.: MGSU Publishing House, 2013. – 152 p.
10. Solomatov, V.I. Intensive technology of concrete / V.I. Solomatov, M.K. Tokhirov, Md. Taher SHAH. – M.: Stroyizdat, 1989. – 270 p.
11. Eisaburo, O. Effekt of  $\gamma$  – ray Irradiation on superplasticiser and superplasticised concretes / O. Eisaburo, T. Yukio, M., Tatsuya H. Yukihiko // Review 37 Jer. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. Tokyo. May 1983. P. 98–100.
12. Komokhov, P.G. Energy and kinetic aspects of concrete destruction mechanics: monograph / P.G. Komokhov, V.P. Popov Samara: Publishing house of the Samara branch of the section "Construction" RIA, 2003. – 152 p.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 691.87+691.327.33

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

**Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб,**  
преподаватель-исследователь,  
соискатель ученой степени кандидата  
технических наук кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Ласьков Николай Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Казанский государственный архитектурно-  
строительный университет  
Россия, 420043, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. Зеленая, д.1,  
тел./факс: (8843) 510-46-01  
E-mail: kgasu@kgasu.ru

**Ефимов Олег Иванович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Металлические конструкции»

**Замалиев Фарит Сахапович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Металлические конструкции»

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

**Al-Chasnavi Yaser Sami Garib,**  
Lecturer-researcher, Applicant for the degree  
of Candidate of Sciences of the department  
«Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Laskov Nikolay Nikolaevich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Kazan State University of Architecture and  
Civil Engineering  
Russia, 420043, Republic of Tatarstan, Kazan,  
1, Zelyonaya St.,  
tel./fax: (8843) 510-46-01  
E-mail: kgasu@kgasu.ru

**Efimov Oleg Ivanovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Metal Structures»

**Zamaliyev Farit Sakhapovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Metal Structures»

### СЦЕПЛЕНИЕ ЖЁСТКОЙ АРМАТУРЫ И ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, О.И. Ефимов, Ф.С. Замалиев, Н.Н. Ласьков

Рассматривается механизм сцепления спаренных в двутавр тонкостенных стальных  
холоднодеформированных оцинкованных профилей в виде швеллеров с лёгким бетоном  
(пенобетоном) при создании облегчённых железобетонных балок с жёсткой арматурой.

*Ключевые слова:* ячеистый бетон, жёсткая арматура, тонкостенные стальные профили,  
сцепление, метод наименьших квадратов

### BONDING BETWEEN RIGID REINFORCEMENT AND CELLULAR CONCRETE

Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, O.I. Efimov, F.S. Zamaliev, N.N. Laskov

The mechanism of bonding thin-walled steel cold-deformed galvanized profiles in the form of  
channels with lightweight concrete (foam concrete), paired in an I-beam, is considered while  
producing lightweight reinforced concrete beams with rigid reinforcement.

*Keywords:* cellular concrete, rigid reinforcement, thin-walled steel profiles, clutch, least square  
method

В зданиях и сооружениях наиболее массовыми конструкциями являются покрытия  
и перекрытия, которые преимущественно работают на изгиб.

В железобетонных несущих конструкциях покрытий и перекрытий имеются  
возможности уменьшения их веса: применение облегчённых балок из легких бетонов;  
использование в качестве жёсткой арматуры этих балок тонкостенных стальных  
холоднодеформированных оцинкованных профилей (ЛСТП). Лёгким бетоном может  
быть пенобетон, который имеет достаточную прочность, долговечность, экологи-  
ческую чистоту и не является горючим.

Сцепление ЛСТП с ячеистым бетоном обеспечивает их совместную работу.  
В обычной ситуации с тяжёлым бетоном сцепление обеспечивается: 1) механическим  
зацеплением неровностей на поверхности стального элемента за бетон; 2) трением  
стального элемента о бетон под действием давления от усадки; 3) собственно  
сцеплением, или «склеиванием», поверхности стального элемента с бетоном [5, 6]. Так  
как для элементов из ячеистых бетонов с жёсткой арматурой без перфорации не  
приходится рассчитывать на сцепление по первым двум позициям, а для элементов из  
ячеистых бетонов с жёсткой арматурой с перфорацией – на вторую, следует  
рассмотреть этот вопрос посредством проведения натурных испытаний.

В данной работе представлены данные натурных испытаний по установлению:

- характеристик сцепления ЛСТП (перфорированного и неперфорированного)  
при ограничении (и без) влияния распорных усилий;
- контрольного материала для его сопоставления с результатами теоретических  
выводов данного направления.

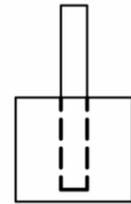
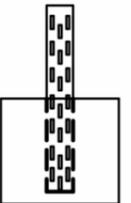
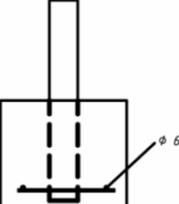
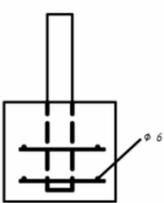
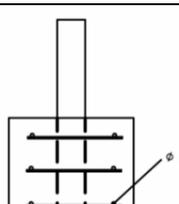
Сцепление ячеистого бетона со сплошной и перфорированной полосой стального  
элемента, имитирующей ЛСТП, определялось путем испытаний на «выдёргивание»  
этой полосы из куба ячеистого бетона. Программа испытаний включала 20 образцов,  
разбитых на пять серий, различающихся армированием, как это показано в таблице  
(рис. 1, 2 и 3).

Испытание железобетонных образцов проводилось на механической машине  
ZDM-5/91 в специально изготовленной стальной раме (рис. 4).

Принципиальная схема испытаний образцов каждой серии представлена на рис. 5.  
Данная схема испытаний наиболее близко моделирует работу ЛСТП и ячеистого  
бетона на участке между двумя смежными трещинами, так как позволяет определять  
их взаимные смещения одновременно с двух торцов испытываемого образца.

При испытаниях образцов они нагружались нагрузкой с шагом 500 Н, и на каждом  
этапе измерялось взаимное смещение полосы и грани куба на обоих его торцах  
посредством восьми индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм и 0,001 мм.  
Подобное измерение позволяет в большей степени отсеять деформации самой полосы  
и не определяемую в данном случае неравномерность распределения сил сцепления по  
длине полосы внутри куба.

Описание серий образцов

Номер серии	Марка серии	Эскиз образца	Класс прочности ячеистого бетона по данным его контрольных испытаний	Сечение пластины (мм)	Кол-во образцов в серии
1	I-B7,5-C		B 7,5	50×1,5	4
2	II-B7,5-II		B 7,5	Просечная 50×2 (перфорированный участок канала CFS)	4
3	I-B7,5-C1		B 7,5	50×1,5	4
4	I-B7,5-C2		B 7,5	50×1,5	4
5	I-B7,5-C3		B 7,5	50×1,5	4

Примечания: 1) по каждой серии изготавливались четыре куба и четыре призмы для контроля класса прочности бетона испытываемых образцов; 2) сетки из арматуры диаметром 6 мм с ячейкой 50×50 мм, шаг 50 мм по высоте.



Рис. 1. Опалубка и установленные полосы для заливки опытных образцов



Рис. 2. Забивка ячеистым бетоном опалубки

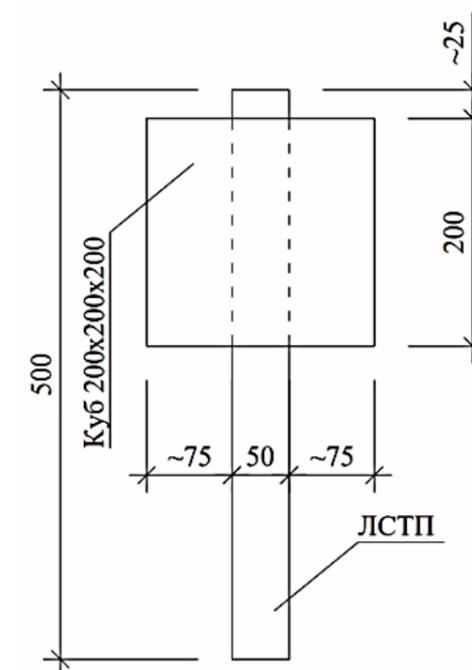


Рис. 3. Схема испытываемых образцов



Рис. 4. Общий вид испытываемого образца в прессе

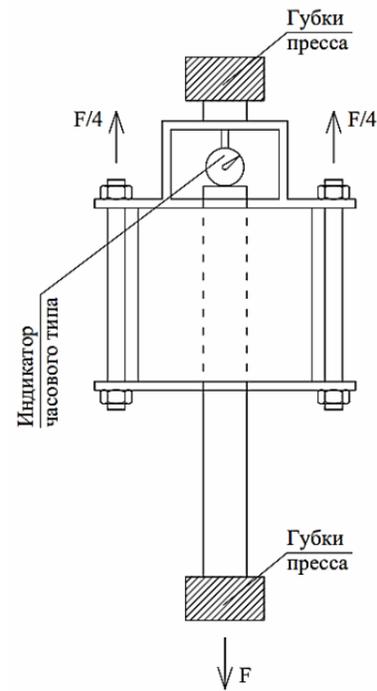


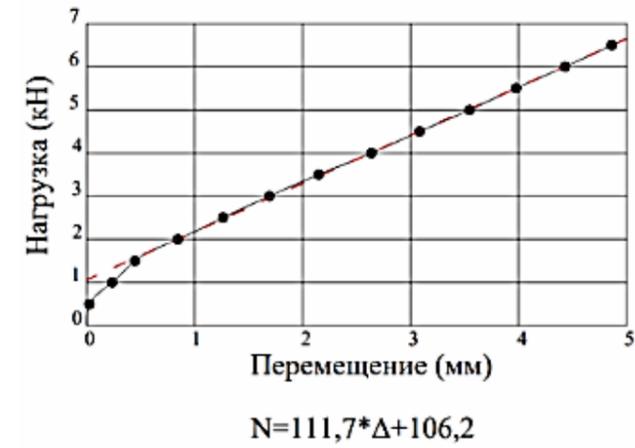
Рис. 5. Принципиальная схема испытаний

Результаты испытаний образцов представлены на рис. 6÷10.

При испытаниях образцов первой серии установлено, что «усреднённый модуль сцепления» на каждой из сторон полосы шириной 5 см при размере сторон куба 20 см составляет:

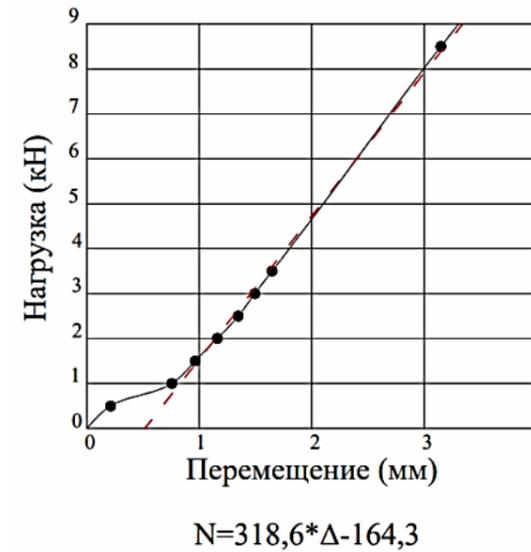
$$E_{\text{сцеп}} = \sigma_{\text{сцеп}}/\varepsilon = [111,7/(2 \cdot 5 \cdot 20)]/(1/200) = 111,7 \text{ кГ/см}^2 = 11,17 \text{ МПа.}$$

При испытаниях образцов второй серии установлено, что «усреднённый модуль сцепления» на каждой из сторон перфорированной полосы шириной 5 см при размере сторон куба 20 см составляет:  $E_{\text{сцеп}} = 318,6 \text{ кГ/см}^2 = 31,86 \text{ МПа.}$



Результаты испытаний четырёх образцов первой серии	
Нагрузка (кН)	Среднее значение перемещений по серии (мм)
0	0
0,5	0,026
1	0,237
1,5	0,447
2	0,844
2,5	1,263
3	1,692
3,5	2,149
4	2,638
4,5	3,083
5	3,546
5,5	3,975
6	4,43
6,5	4,863

Рис. 6. Результаты испытаний образцов первой серии. Линейная аппроксимация диаграммы по методу наименьших квадратов Гаусса (кГ)



Результаты испытаний четырёх образцов второй серии	
Нагрузка (кН)	Среднее значение перемещений по серии (мм)
0	0
0,5	0,212
1	0,756
1,5	0,964
2	1,16
2,5	1,346
3	1,494
3,5	1,647
8,5	3,148

Рис. 7. Результаты испытаний образцов второй серии. Линейная аппроксимация диаграммы по методу наименьших квадратов Гаусса (кГ)

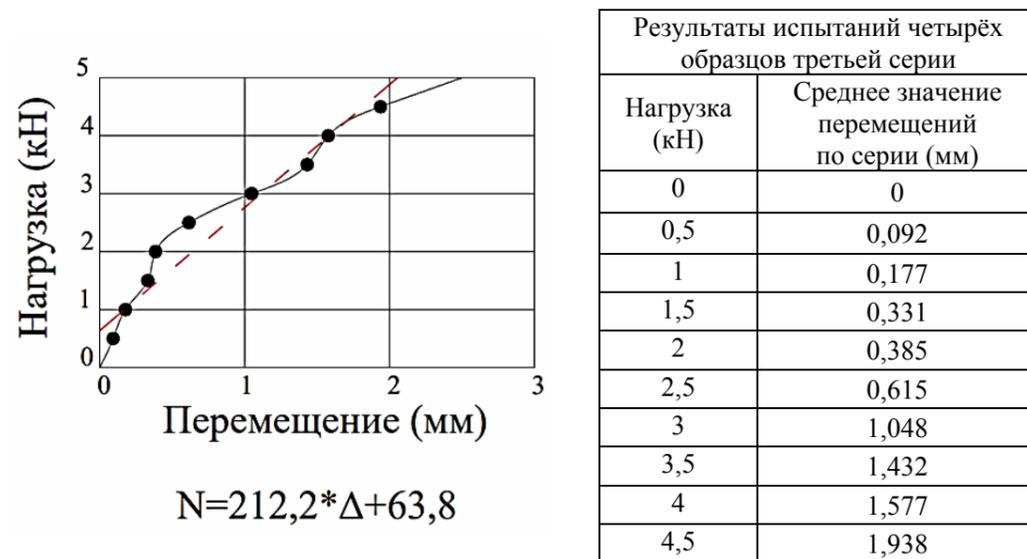


Рис. 8. Результаты испытаний образцов третьей серии. Линейная аппроксимация диаграммы по методу наименьших квадратов Гаусса (кГ)

При испытаниях образцов третьей серии установлено, что «усреднённый модуль сцепления» на каждой из сторон полосы шириной 5 см при размере сторон куба 20 см составляет:  $E_{\text{сцеп}}=212,2 \text{ кГ/см}^2=21,22 \text{ МПа}$ .

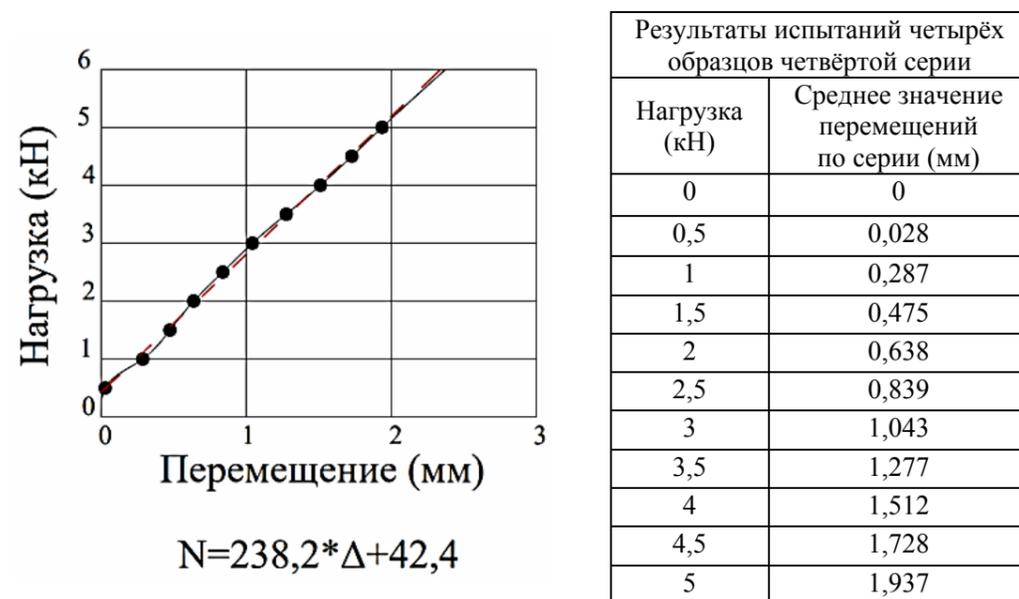


Рис. 9. Результаты испытаний образцов четвёртой серии. Линейная аппроксимация диаграммы по методу наименьших квадратов Гаусса (кГ)

При испытаниях образцов четвёртой серии установлено, что «усреднённый модуль сцепления» на каждой из сторон полосы шириной 5 см при размере сторон куба 20 см составляет:  $E_{\text{сцеп}}=238,2 \text{ кГ/см}^2=23,82 \text{ МПа}$ .

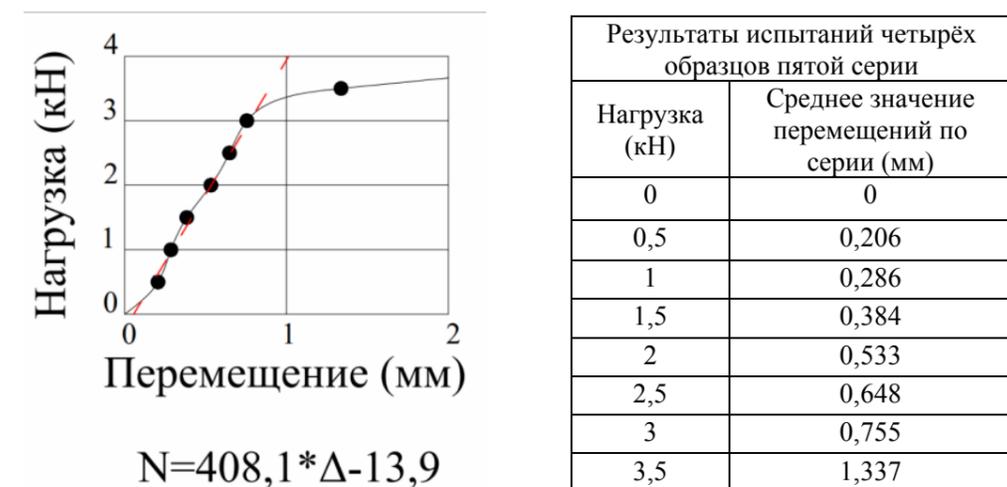


Рис. 10. Результаты испытаний образцов пятой серии. Линейная аппроксимация диаграммы по методу наименьших квадратов Гаусса (кГ)

При испытаниях образцов пятой серии установлено, что «усреднённый модуль сцепления» на каждой из сторон полосы шириной 5 см при размере сторон куба 20 см составляет:  $E_{\text{сцеп}}=408,1 \text{ кГ/см}^2=40,81 \text{ МПа}$ .

Выводы:

1. При анализе результатов испытаний пяти серий образцов из ячеистого бетона класса прочности В7,5 установлено, что «усреднённый модуль сцепления» полосы с бетоном ( $E_{\text{сцеп}}$ ) больше модуля деформаций ячеистого бетона при продолжительном действии нагрузки [1].
2. «Усреднённый модуль сцепления» полосы с ячеистым бетоном значительно увеличивается при использовании перфорации полосы, что естественно (см. рис. 7).
3. «Усреднённый модуль сцепления» полосы с ячеистым бетоном существенно повышается при применении поперечной стержневой арматуры даже в зоне «чистого изгиба» (см. рис. 8÷10).
4. «Усреднённый модуль сцепления» полосы с ячеистым бетоном наиболее существенно повышается при использовании поперечной стержневой арматуры в зоне действия максимальных напряжений сцепления [5], т.е. на «выходе» полосы из бетонного массива (см. рис. 10).

#### Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Стандартинформ, 2019.
2. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М., 2017.
3. Методическое пособие по расчёту и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 2019.
4. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 1978.
5. Справочник проектировщика. Расчётно-теоретический / под. ред. А.А. Уманского. – М.: Стройиздат, 1972. – Кн. 1.
6. Михайлов, К.В. Проволочная арматура для предварительно напряжённого железобетона / К.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1964.

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. – М., Standartinform, 2019.
2. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules. – М., 2017.
3. Methodological guide for the calculation and design of steel-reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – М., 2019.
4. Guidelines for the design of reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – М., 1978.
5. Designer's Handbook. Computational and theoretical / edited by A.A. Umansky. – М.: Stroyizdat, 1972. – Book 1.
6. Mikhailov, K.V. Wire reinforcement for prestressed reinforced concrete / K.V. Mikhailov. – М.: Stroyizdat, 1964.

УДК 624.072.2:691.327.33

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

**Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб**,  
преподаватель-исследователь,  
соискатель ученой степени кандидата  
технических наук кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Ласьков Николай Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Казанский государственный архитектурно-  
строительный университет  
Россия, 420043, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. Зеленая, д.1,  
тел./факс: (8843) 510-46-01  
E-mail: kgasu@kgasu.ru

**Ефимов Олег Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Металлические конструкции»

**Замалиев Фарит Сахапович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Металлические конструкции»

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

**Al-Chasnavi Yaser Sami Garib**,  
Lecturer-researcher, Applicant for the degree  
of Candidate of Sciences of the department  
«Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

**Laskov Nikolay Nikolaevich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Kazan State University of Architecture and  
Civil Engineering  
Russia, 420043, Republic of Tatarstan, Kazan,  
1, Zelyonaya St.,  
tel./fax: (8843) 510-46-01  
E-mail: kgasu@kgasu.ru

**Efimov Oleg Ivanovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Metal Structures»

**Zamaliyev Farit Sakhapovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Metal Structures»

## ПРЕДПОСЫЛКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ К НЕЛИНЕЙНОМУ РАСЧЁТУ СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК ИЗ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА С ЖЁСТКОЙ АРМАТУРОЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, О.И. Ефимов, Ф.С. Замалиев, Н.Н. Ласьков

Рассматривается вопрос о выявлении предпосылок и ограничений уровня напряжений в жесткой арматуре сталежелезобетонных балок для выполнения их нелинейного расчета с помощью программ методов конечных элементов.

*Ключевые слова:* ячеистый бетон; жёсткая арматура; тонкостенные стальные профили; местная устойчивость

## PREREQUISITES AND LIMITATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE BEAMS MADE OF AERATED CONCRETE WITH RIGID REINFORCEMENT OF THIN-WALLED STEEL BENT SECTIONS

Al-Chasnavi Yaser Sami Garib, O.I. Efimov, F.S. Zamaliyev, N.N. Laskov

In this paper, the issue of identifying the prerequisites and limitations of the stress level in the rigid reinforcement of steel-reinforced concrete beams is considered for performing their nonlinear calculation using programs of finite element methods.

*Keywords:* cellular concrete; rigid reinforcement; thin-walled steel profiles; local stability

Единственно приемлемым для проектирования сталебетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой из тонкостенных стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей (ЛСТП) является нелинейный расчёт с использованием двухлинейной или трёхлинейной диаграммы состояния сжатого бетона [1, 2, 3].

Если с ограничениями, связанными с поведением бетона, более-менее всё ясно, т.е. известны предельные относительные деформации сжатия и растяжения, расчётные сопротивления осевому сжатию и растяжению, с ограничениями, связанными с поведением жёсткой арматуры из ЛСТП ясно не всё. В частности, неизвестно, что закладывать в алгоритм в качестве ограничения уровня нормальных напряжений в ЛСТП –  $R_y$  или критические напряжения потери местной устойчивости  $\sigma_{cr}$ . В настоящей работе рассматривается решение этого вопроса.

Предпосылки и ограничения для алгоритма прикладного нелинейного расчёта железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой из ЛСТП устанавливаются на основе анализа поведения таких балок по результатам численных и натурных испытаний.

**Первый случай.**

Анализируются результаты численного и натурных испытаний трёх балок по рис. 1.

Численный эксперимент выполнен с использованием нелинейного расчёта ПК «ANSYS», где расчётная модель соответствует рис. 1.

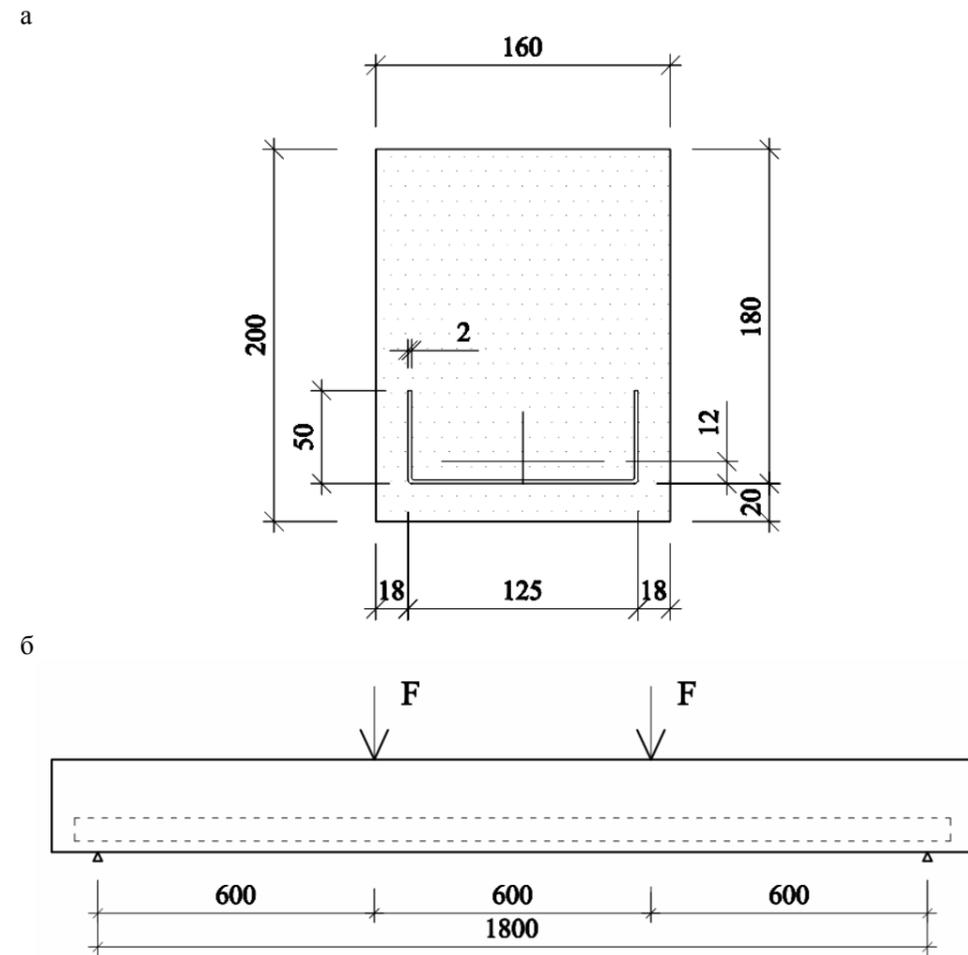


Рис. 1. Железобетонная балка из ячеистого бетона В2,5 с армированием жёсткой арматурой в виде гнутого швеллера:  
а – поперечное сечение; б – схема загрузки

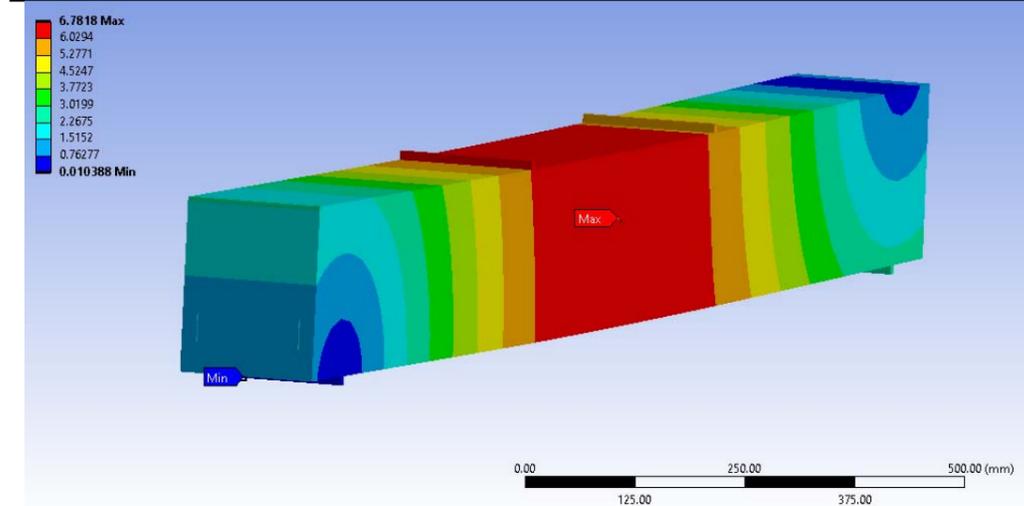


Рис. 2. Изополя вертикальных перемещений балки в момент «условного разрушения»

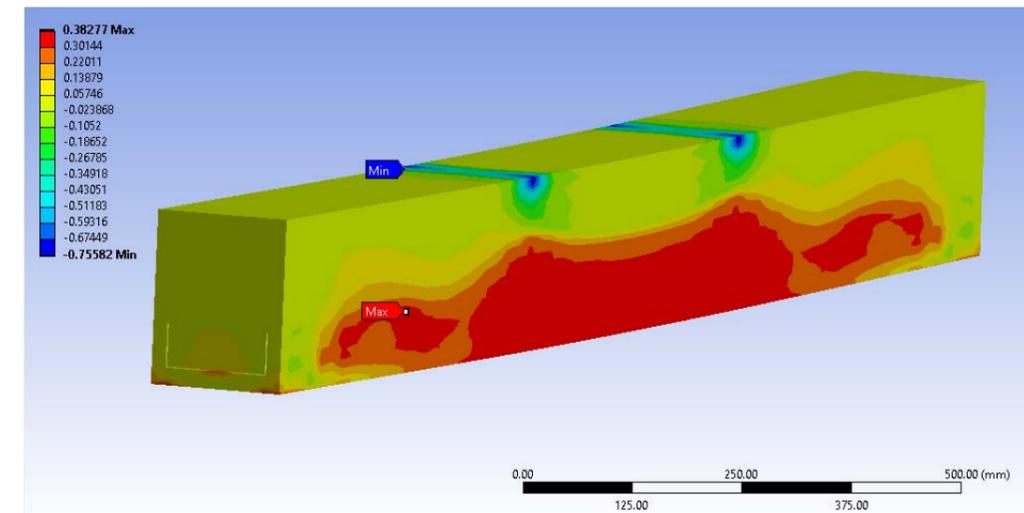


Рис. 3. Изополя напряжений в бетоне балки в момент «условного разрушения»

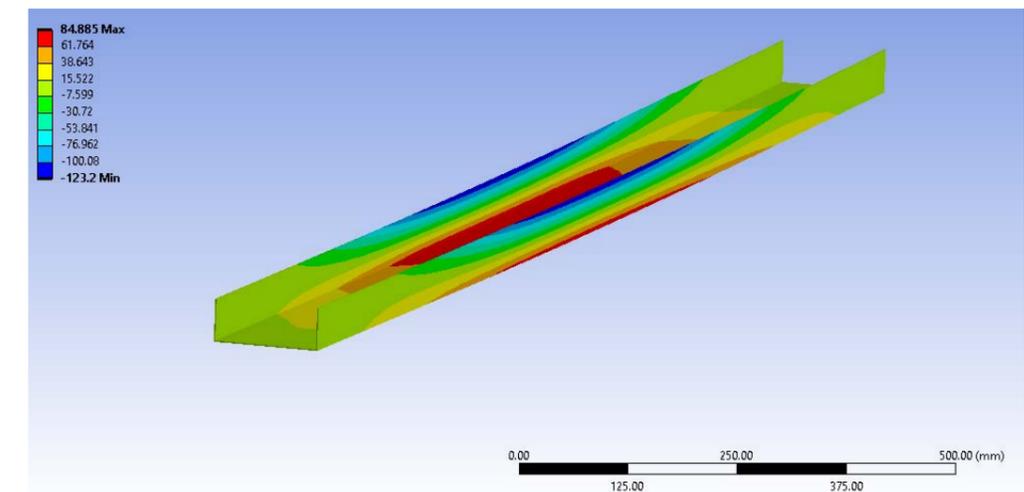


Рис. 4. Изополя напряжений в жёсткой арматуре балки в момент «условного разрушения»

Правильность выбранных параметров расчётной модели в ПК «ANSYS» подчёркивает то, что диаграмма «нагрузка – прогиб», полученная в результате использования этого комплекса, хорошо соответствует аналогичным диаграммам натуральных испытаний трёх балок (см. рис. 5).

ПК «ANSYS» осуществлял сходящийся нелинейный расчёт модели до момента приложения узловой нагрузки в 437,5 кГ, или 4,375 кН. Далее процесс нелинейного расчёта перестал быть сходящимся, т.е. система переродилась (см. рис. 6). Этот рубеж будем называть «условным разрушением». Естественно считать, что в дальнейшем разрабатываемый прикладной нелинейный расчёт такой конструктивной формы должен «выдавать» расчётные нагрузки по первой и второй группам предельных состояний, которые меньше нагрузок «условного разрушения».

На момент «условного разрушения» в результате нелинейного расчёта с использованием ПК «ANSYS» получено следующее:

- прогиб балки – 6,782 мм;
- максимальные растягивающие напряжения в бетоне – 0,383 МПа, зона растягивающих напряжений занимает 2/3 высоты сечения балки;
- максимальные сжимающие напряжения в верхних кромках полок гнутого швеллера – 123,2 МПа.

Необходимо отметить, что на протяжении всех шагов нелинейного расчёта ПК «ANSYS» показывал наличие сжимающих напряжений в верхних кромках поясов гнутого швеллера, т.е. сжатая зона бетона занимала около 75 % высоты сечения балки. Из этого следует, что в докритической стадии работы балки напряжения в гнутом швеллере не достигают уровня  $R_y$ .

Полки швеллера представляют собой бесконечные пластины, жёстко заделанные в месте примыкания к его стенке, при этом распределение нормальных напряжений соответствует изгибу ( $\sigma_{max}=84,88$  МПа,  $\sigma_{min}=-123,2$  МПа).

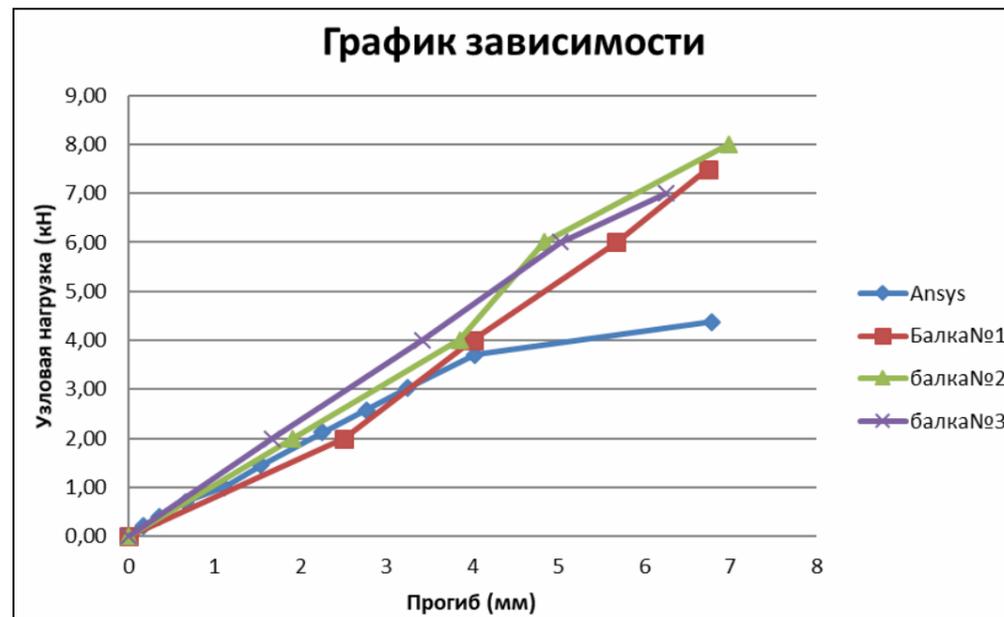


Рис. 5. Сопоставительные диаграммы «нагрузка – прогиб» для численного и натурального испытаний

Если представить, что бетон не укрепляет полки швеллера от потери местной устойчивости, то минимально возможное критическое напряжение составит по [4]:

$$\sigma_{cr} = K_{min} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 1,34 \frac{\pi^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5}{12(1-0,3^2)} \left(\frac{2}{46}\right)^2 = 471,62 \gg 123,2 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Очевидно, что в рассматриваемой ситуации критические напряжения потери устойчивости будут ещё больше, т.е. эту величину нельзя закладывать в виде ограничения для алгоритма прикладного нелинейного расчёта для балок из ячеистого бетона с В2,5 армированных гнутым швеллером по рис. 1.

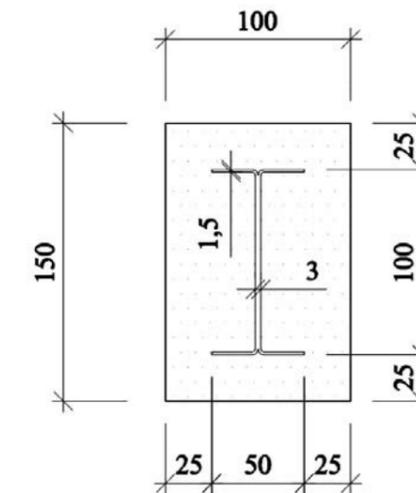


Рис. 6. Характерное разрушение всех трёх испытываемых балок, подтверждающее факт перерождения системы

Второй случай.

Анализируются результаты численного и натуральных испытаний трёх балок по рис. 7.

а



б

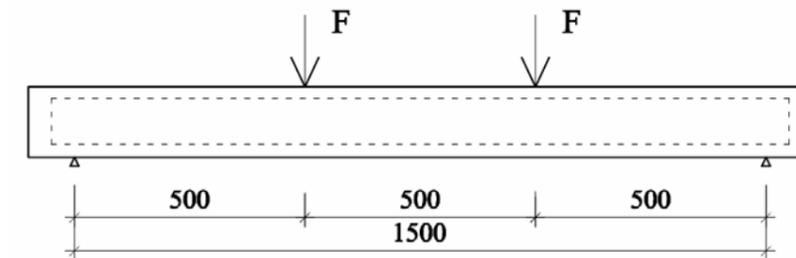


Рис. 7. Железобетонная балка из ячеистого бетона В7,5 с армированием жёсткой арматурой в виде составленных в двутавр гнутых швеллеров: а – поперечное сечение; б – схема загрузки

Численный эксперимент выполнен с использованием нелинейного расчёта ПК «ANSYS», где расчётная модель соответствует рис. 7.

Правильность выбранных параметров расчётной модели в ПК «ANSYS» подчёркивает то, что диаграмма «нагрузка – прогиб», полученная в результате использования этого комплекса, хорошо соответствует аналогичным диаграммам натуральных испытаний трёх балок (см. рис. 11).

ПК «ANSYS» осуществлял сходящийся нелинейный расчёт модели до момента приложения узловой нагрузки в 795 кГ, или 7,95 кН. Далее процесс нелинейного расчёта перестал быть сходящимся, т.е. система переродилась. И этот рубеж будем называть «условным разрушением». Как и прежде, естественно считать, что в дальнейшем разрабатываемый прикладной нелинейный расчёт такой конструктивной формы должен «выдавать» расчётные нагрузки по первой и второй группам предельных состояний, которые меньше нагрузок «условного разрушения».

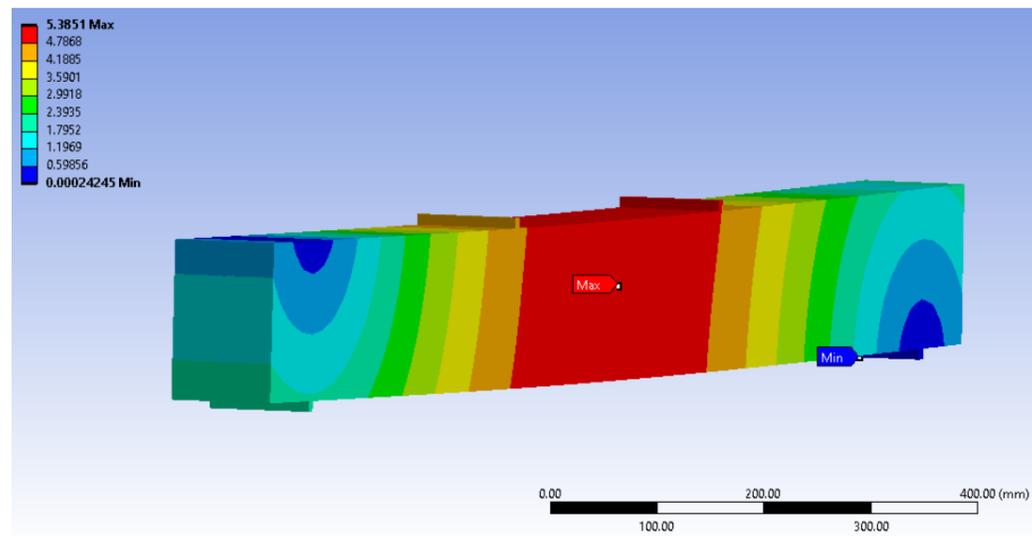


Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений балки в момент «условного разрушения»

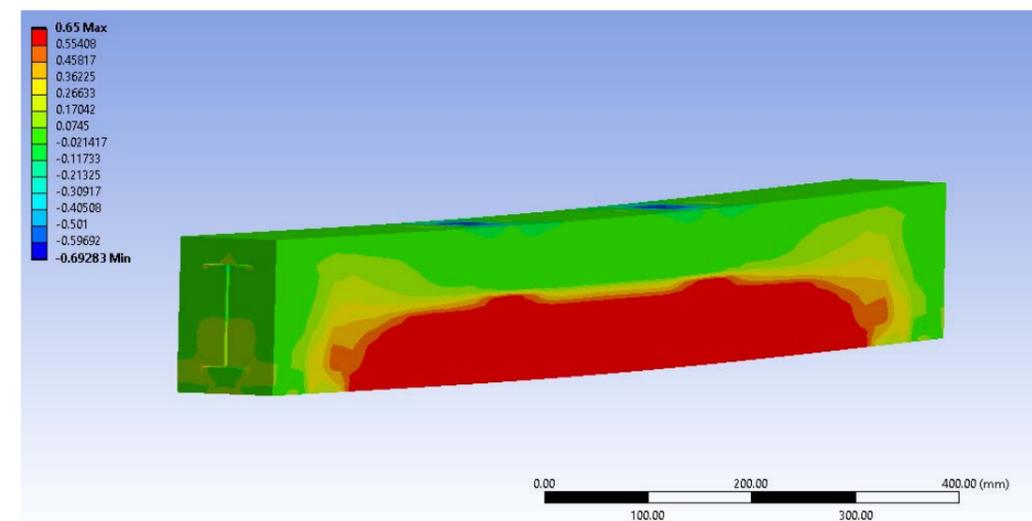


Рис. 9. Изополя напряжений в бетоне балки в момент «условного разрушения»

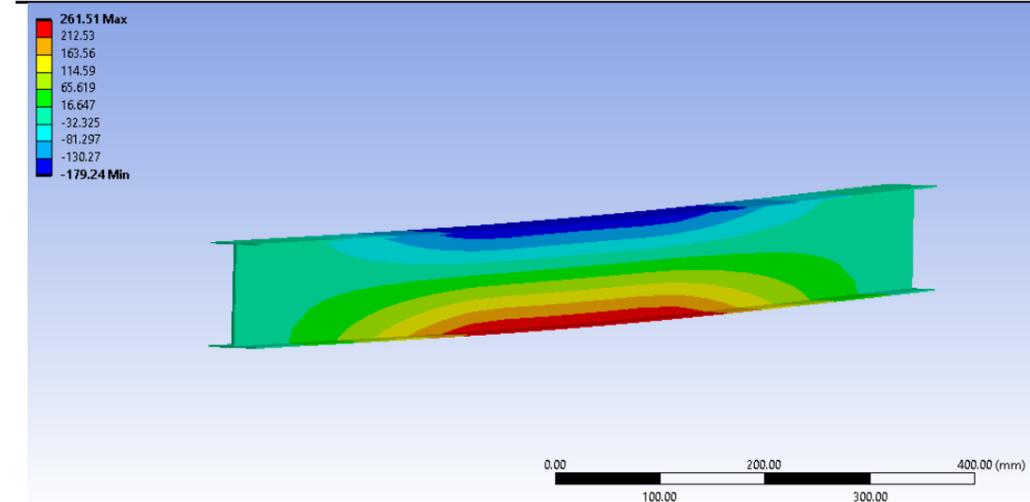


Рис. 10. Изополя напряжений в жёсткой арматуре балки в момент «условного разрушения»

На момент «условного разрушения» в результате нелинейного расчёта с использованием ПК «ANSYS» получено следующее:

- прогиб балки – 5,385 мм;
- максимальные растягивающие напряжения в бетоне – 0,65 МПа, зона растягивающих напряжений занимает 1/2 высоты сечения балки;
- максимальные сжимающие напряжения в верхних кромках полок гнутого швеллера – 179,24 МПа.

Полки двутавра из гнутых швеллеров представляют собой бесконечные пластины, жёстко заделанные в месте их примыкания к стенке, при этом распределение нормальных напряжений соответствует равномерному сжатию.

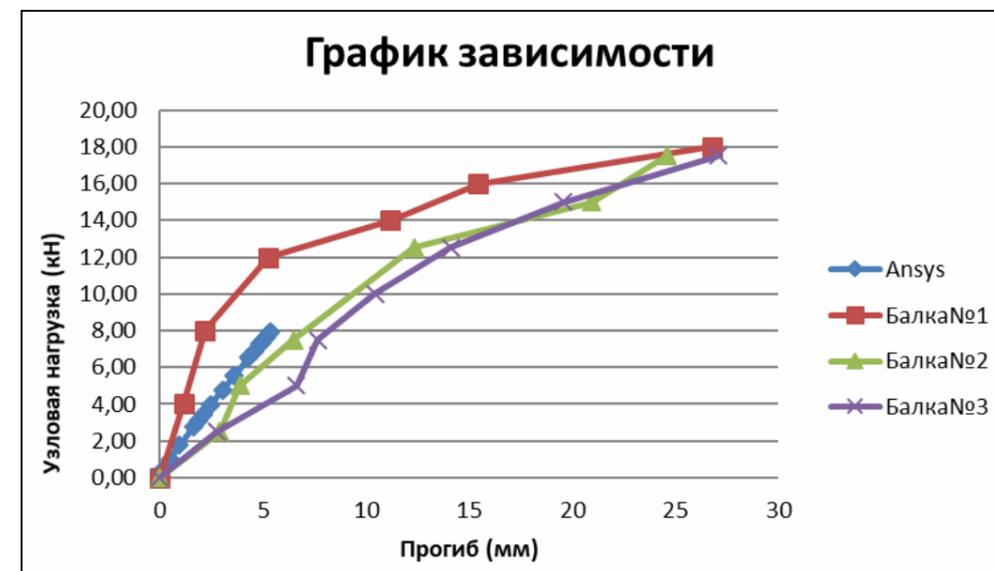


Рис. 11. Сопоставительные диаграммы «нагрузка – прогиб» для численного и натурального испытаний

Если представить, что бетон не укрепляет полки двутавра от потери местной устойчивости, то максимально возможное критическое напряжение составит по [4]:

$$\sigma_{cr} = 0,25E \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 0,25 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \left( \frac{2}{46} \right)^2 = 239,41 \gg 179,24 \text{ МПа.} \quad (2)$$

Очевидно, что и в рассматриваемой ситуации критические напряжения потери устойчивости будут ещё больше, т.е. эту величину нельзя закладывать в виде ограничения для алгоритма прикладного нелинейного расчёта для балок из ячеистого бетона с В7,5, армированных жёсткой арматурой в виде двутавра, составленного из двух гнутых швеллеров по рис. 7.

#### Вывод

Анализ результатов численных и натурных испытаний вышерассмотренных балок показывает, что для разработки алгоритма прикладного нелинейного расчёта железобетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой в качестве ограничения её поведения не следует использовать критические напряжения потери местной устойчивости.

#### Список литературы

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Стандартинформ, 2019.
2. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М., 2017.
3. Методическое пособие по расчёту и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 2019.
4. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жёсткой арматурой. – М., 1978.
5. Справочник проектировщика. Расчётно-теоретический / под. ред. А.А. Уманского. – М., 1973. – Кн. 2.
6. Замалиев, Ф.С. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок / Ф.С. Замалиев // Известия КГАСУ. – 2017. – № 4 (42). – С. 150–158.
7. Замалиев, Ф.С. Численные эксперименты и натурные испытания сталежелезобетонных балок на основе гнутых профилей / Ф.С. Замалиев // Вестник МГСУ – 2019. – № 1. – С. 22–32.

#### References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. – M., Standartinform, 2019.
2. SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules. – M., 2017.
3. Methodological guide for the calculation and design of steel-reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – M., 2019.
4. Guidelines for the design of reinforced concrete structures with rigid reinforcement. – M., 1978.
5. Designer's Handbook. Computational and theoretical / edited by A.A. Umansky. – M., 1973. – Book 2.
6. Zamaliev, F.S. Numerical and experimental investigation of steel-concrete composite beams / F.S. Zamaliev // Izvestiya KGASU. – 2017. – № 4 (42). – P. 150–158.
7. Zamaliev, F.S. Numerical experiments and full-scale tests of reinforced concrete beams on the basis of bent profiles / F.S. Zamaliev // Vestnik MGSU. – 2019. – No. 1. – P. 22–32.

УДК 624.04

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

**Монахов Владимир Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Механика»  
E-mail: monahovnn@mail.ru

**Зайцев Михаил Борисович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механика»

*Penza State University of Architecture and Construction*

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

**Monakhov Vladimir Andreevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Mechanics»  
E-mail: monahovnn@mail.ru

**Zaytsev Mihail Borisovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Mechanics»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДВОЙСТВЕННОСТИ

В.А. Монахов, М.Б. Зайцев

Рассматривается методика определения НДС стержневой системы на основе модели механической системы, полученной при её дискретизации. Топологическая структура модели, её геометрические и физико-механические параметры задаются в матричной форме с помощью графа стержневой системы и сопутствующих матриц инцидентности, узловых координат и жёсткости. Матричное преобразование вектора узловых перемещений в сочетании с расширенной матрицей инцидентности приводит к геометрической матрице, характеризующей сосредоточенные изгибные деформации в расчетных сечениях стержневой системы в зависимости от узловых перемещений при заданной нагрузке. В соответствии с принципом двойственности задач строительной механики на основе геометрической матрицы несложно сформировать матрицу влияния изгибающих моментов, с помощью которой процедура расчёта стержневой системы осуществляется в матричной форме.

*Ключевые слова: стержневая система, модель, конечные элементы, граф рамы, узловые перемещения*

## DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF ROD SYSTEM BASED ON PRINCIPLE OF DUALITY

V.A. Monakhov, M.B. Zaytsev

The method of determining the VAT of a rod system based on the model of a mechanical system obtained during its discretization is considered. The topological structure of the model, its geometric and physico-mechanical parameters are set in matrix form using the graph of the rod system and the accompanying matrices of incidence, nodal coordinates and stiffness. The matrix transformation of the nodal displacement vector in combination with the expanded incidence matrix leads to a geometric matrix that characterizes the concentrated bending deformations in the calculated sections of the rod system depending on the nodal displacements at a given load. In accordance with the principle of duality of problems of structural mechanics, it is easy to form a matrix of the influence of bending moments on the basis of a geometric matrix, with the help of which the procedure for calculating the rod system is carried out in a matrix form.

*Keywords: rod system, model, finite elements, frame graph, nodal movements*

Численный анализ напряжённо-деформированного состояния стержневых систем сопряжён с формированием одной из трёх основных матриц состояния: геометрической  $[H]$ , матрицы равновесия  $[V]$  и влияния изгибающих моментов  $[\Lambda]$  [1, 2]. Любая из них позволяет рассчитать стержневую систему в матричной форме не только по прочности, жёсткости и несущей способности, но и на устойчивость, поскольку согласно принципу двойственности усилий и деформаций справедливо тождество  $[V] \equiv [H]^T \equiv [\Lambda]^{-1}$ . Матричная форма записи уравнений состояния

$$[V] \bar{M} - \bar{P} = 0, \quad [H] \bar{Y} - \bar{\kappa} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{M}$ ,  $\bar{P}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{\kappa}$  – соответственно, векторы изгибающих моментов, узловых нагрузок, перемещений и сосредоточенных кривизн, позволяет выполнить расчёт в автоматическом режиме. Применение той или иной матрицы состояния в качестве базовой зависит от типа стержневой системы.

Для расчёта статически определимых балок более эффективной является матрица влияния изгибающих моментов  $[\Lambda]$ , т.к. её формирование осуществляется непосредственно по линиям влияния моментов [3]. При расчёте ферм целесообразно оттапливаться от матрицы равновесия  $[V]$ .

Поставим задачу автоматического формирования геометрической матрицы  $[H]$  для расчёта любых стержневых систем на основе принципа двойственности, которая является наиболее эффективной. Основная особенность этой матрицы состоит в том, что ее применение никак не связано с классическими методами строительной механики и современным методом конечных элементов.

Алгоритм формирования матрицы  $[H]$  покажем на примере расчета стержневой системы (рис. 1,а).

В основу алгоритма уже на этапе задания расчётной схемы стержневой системы положено цифровое описание её топологической структуры. С этой целью применяются методы теории графов, благодаря которым структура стержневой системы (рис. 1,а), точнее, её дискретной модели (рис. 1,б), может быть описана с помощью матрицы инцидентности графа рамы (рис. 1,в) [4, 5].

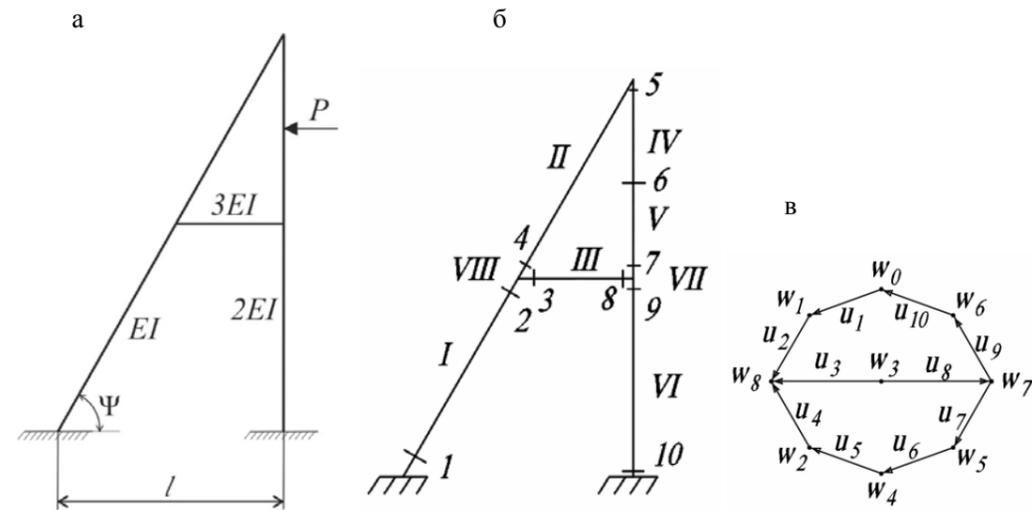


Рис. 1. Расчетная схема рамы, её дискретная модель и граф

$$[S]_{(6 \times 8)} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Используя глобальную систему координат  $\eta\Omega\theta$ , далее составляем матрицу координат узлов

$$[K] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ y_1 & y_2 & \dots & y_m \end{bmatrix}$$

В первой строке матрицы располагаются абсциссы координат узлов  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ), во второй – ординаты  $y_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) соответствующих узлов;  $m$  – число узлов дискретной схемы или вершин графа. При этом нумерация узлов при формировании матрицы  $[K]$  совпадает с той, что используется как при построении графа стержневой системы, так и при формировании матрицы инцидентности. Вычислив произведение матриц  $[U] = [K][S]^T$ , находим проекции длин стержней. В дальнейшем используется процедура автоматического формирования геометрической матрицы, которая в соответствии с принципом двойственности строительной механики позволяет установить и матрицу равновесия [5].

$$[H_0]_{(8 \times 5)} = [S]_{(8 \times 6)}^T [A]_{(6 \times 5)} = \begin{bmatrix} 0,886 & -0,5 & 0 & 0 & 0 \\ -0,886 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0,886 & -0,5 & -0,866 & 0 & 0 \\ -0,886 & 0,5 & -1,444 & 2,309 & 0 \\ 0 & 0 & 2,309 & -4,619 & 2,309 \\ 0 & 0 & 0 & 2,309 & -2,309 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

с помощью которой вычисляют сосредоточенные деформации изгиба в узлах стержневой системы согласно  $\bar{\kappa}_{(8)} = [H_0]_{(8 \times 5)} \bar{\zeta}_{(5)}$ . Полученная матрица характеризует схему деформаций рамы, возникающую вследствие узловых линейных перемещений. Т.к. ригель рамы, как и любой другой её элемент, нерастяжим ( $\zeta_3 = \zeta_9$ ), то последний столбец данной матрицы можно совместить с первым. Одновременно матрицу следует дополнить двумя столбцами, соответствующими ещё двум возможным схемам деформаций. Последние обусловлены поворотами узловых КЭ на углы  $\vartheta_5$ ,  $\vartheta_6$ . Если линейные перемещения узлов переобозначить, считая  $\vartheta_1 = \zeta_3$ ,  $\vartheta_2 = \zeta_4$ ,  $\vartheta_3 = \zeta_5$ ,  $\vartheta_4 = \zeta_7$ , а для угловых, как принято выше, продолжить нумерацию индексов, то деформации изгиба, сосредоточенные в расчётных сечениях рамы, можно вычислить по формуле

$$\bar{\kappa}_{(10)} = [H]_{(10 \times 6)} \bar{\vartheta}_{(6)}$$

где

$$[H]_{(10 \times 6)} = \begin{bmatrix} 0,87 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,87 & 0,5 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0,87 & 0,5 & -0,87 & 0 & 1 & 0 \\ -0,87 & -0,5 & -1,44 & 2,31 & 0 & 0 \\ 2,31 & 0 & 2,31 & -4,62 & 0 & 0 \\ -2,31 & 0 & 0 & 2,31 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1,155 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1,155 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$\bar{\vartheta}_{(6)} = (\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_6)$  – обобщённый вектор узловых перемещений. На рис. 2 приводится схема изгибных деформаций рамы. Полученная геометрическая матрица  $[H]$  связывает независимые узловые перемещения  $\bar{\vartheta}_{(6)}$  с сосредоточенными деформациями изгиба в её узлах, характеризуя конфигурацию стержневой системы в деформированном состоянии.

Чтобы вычислить матрицу влияния изгибающих моментов  $[\Lambda]_{(10 \times 6)}$ , по которой находятся моменты в расчётных сечениях рамы

$$\bar{M}_{(10)} = [\Lambda]_{(10 \times 6)} \bar{P}_{(6)},$$

где  $\bar{P}_{(6)} = (0 \ 0 \ 0 \ -5000 \ 0 \ 0)$  – вектор

внешних воздействий, прикладываемых в узлах, необходимо сначала найти матрицу внешней жёсткости рамы  $[R]_{(6 \times 6)} = [H]_{(6 \times 10)}^T [C]_{(10 \times 10)} [H]_{(10 \times 6)}$ . Здесь  $[C]$  – квазидиагональная матрица внутренней жёсткости, состоящая из ячеек жёсткости отдельных элементов

$$[c_k] = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{2E_k I_k}{l_k},$$

где  $E_k$  – модуль упругости материала;  $I_k$  – момент инерции поперечного сечения  $k$ -го элемента;  $l_k$  – его длина. Процедура составления матрицы  $[C]$  легко формализуется. Для этого следует вычислить сначала погонные жёсткости элементов:

$$i_1 = i_{II} = \frac{E_1 I_1}{l_1} = \frac{EI}{1}, \quad i_{III} = \frac{E_3 I_3}{l_3} = \frac{3EI}{0,5} = 6EI,$$

$$i_{IV} = i_V = \frac{E_4 I_4}{l_4} = \frac{2EI}{0,44} = 4,62EI, \quad i_{VI} = \frac{2EI}{0,87} = 2,31EI,$$

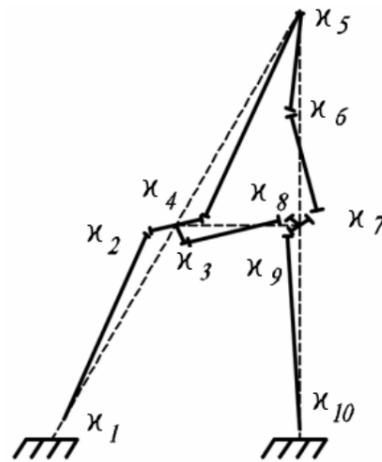


Рис. 2. Схема изгибных деформаций рамы

и, приняв, например, первую из них за основу –  $i_I^0 = \frac{EI}{l}$ , остальные жёсткости  $i_k$  ( $k = II, III, \dots, VI$ ) выразить с помощью коэффициентов приведения  $\beta_{II} = \frac{i_{II}}{i_I^0} = 1$ ,  $\beta_{III} = \frac{i_{III}}{i_I^0} = 6$ ,  $\beta_{IV} = \frac{i_{IV}}{i_I^0} = 4,62$ ,  $\beta_{VI} = \frac{i_{VI}}{i_I^0} = 2,31$ ; очевидно,  $\beta_I = 1$ .

Тогда матрица внутренней жёсткости предстанет в виде матрицы десятого порядка

$$[C]_{(10 \times 10)} = \begin{bmatrix} [c_I] & & & & & & & & & \\ & [c_{II}] & & & & & & & & \\ & & \dots & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & [c_{VI}] \end{bmatrix}$$

$$\text{где } [c_I] = [c_{II}] = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \frac{2EI}{l},$$

$[c_{III}] = \beta_{III} [c_I]$ ,  $[c_{IV}] = [c_V] = \beta_{IV} [c_I]$ ,  $[c_{VI}] = \beta_{VI} [c_I]$  – ячейки жёсткости I-VI элементов, расположенные на диагонали в соответствии с их нумерацией на схеме рамы. Снижение порядка этой матрицы объясняется частичным наложением ячеек четвертого и пятого элементов. С учётом числовых значений коэффициентов приведения матрица внутренней жёсткости рамы принимает следующий вид:

$$[C]_{(10 \times 10)} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 11,24 & -4,62 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4,62 & 18,48 & -4,62 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4,62 & 9,24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4,62 & -2,31 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2,31 & 4,62 \end{bmatrix} \times 2EI.$$

Умножив её на геометрическую матрицу, приходят к матрице усилий  $[T]_{(10 \times 6)} = [C]_{(10 \times 10)} [H]_{(10 \times 6)}$ , соответствующей единичным перемещениям.

Последующее умножение матрицы равновесия  $[V]_{(6 \times 10)} = [H]_{(10 \times 6)}^T$  на  $[T]_{(10 \times 6)}$  приводит к матрице (внешней) жёсткости  $[R]_{(6 \times 6)}$ . Результатом обращения матрицы жёсткости является матрица внешней податливости  $[\Delta]_{(6 \times 6)}$ . Благодаря ей находят узловые перемещения  $\bar{Y}_{(6)} = [\Delta]_{(6 \times 6)} \bar{P}_{(6)} = (-242 \ -109 \ -526 \ -385 \ 183 \ -288) / EI$

при действии заданной внешней нагрузки  $\bar{P}_{(6)} = (0 \ 0 \ 0 \ -5000 \ 0 \ 0)$  по направлениям независимых переменных. Ещё одно умножение матрицы единичных усилий  $[T]_{(10 \times 6)}$ , но уже на матрицу  $[\Delta]_{(6 \times 6)}$  даёт матрицу влияния изгибающих моментов  $[\Lambda]_{(10 \times 6)} = [T]_{(10 \times 6)} [\Delta]_{(6 \times 6)}$ .

Эпюра изгибающих моментов в раме (рис. 3) построена на основе вектора моментов  $\bar{M}_{(10)} = [\Lambda]_{(10 \times 6)} \bar{P}_{(6)}$ .

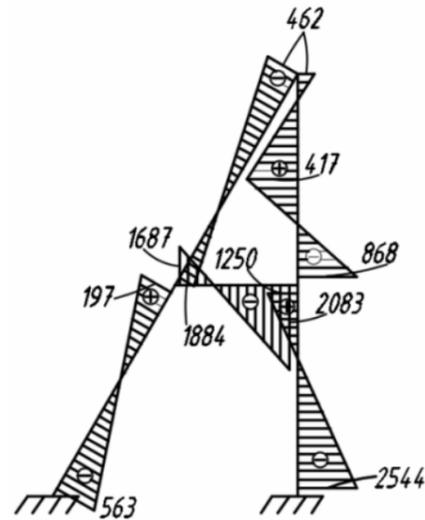


Рис. 3. Эпюра изгибающих моментов

#### Выводы

1. Представлена методика определения НДС стержневой системы на основе модели механической системы, полученной при её дискретизации.
2. Показан алгоритм численного расчёта стержневой системы в соответствии с принципом двойственности задач строительной механики на основе геометрической матрицы.
3. Применение геометрической матрицы  $[H]$ , формирование которой, как и матрицы влияния изгибающих моментов  $[\Lambda]$ , осуществляется в автоматическом режиме, существенно упрощает расчёт стержневых систем не только по прочности, но и по несущей способности, т.к. в последнем случае при использовании кинематического метода теории предельного равновесия ориентируются на возможные схемы конфигураций системы при возникновении сосредоточенных деформаций стержней в расчётных сечениях.

#### Список литературы

1. Монахов, В.А. Методика определения конфигурации стержневой системы при внешнем воздействии / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3 (44). – С. 39–45.
2. Монахов, В.А. Алгоритм расчёта рамы на устойчивость на основе дискретной модели расщеплённого стержня / В.А. Монахов, Р. Саакян, А. Урин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2.
3. Крюкова, Д.В. Алгоритм построения геометрической матрицы стержневой системы / Д.В. Крюкова, В.А. Монахов, А.И. Шеин // Интернет-журнал «Наукоедение». – 2015. – Т. 7, №3. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/50TVN315>.
4. Монахов, В.А. Формирование матрицы равновесия стержневой системы на основе принципа двойственности задач строительной механики / В.А. Монахов // Труды конференции ICMTMTE2019 Севастополь, 12-13 сентября. MATEC Web of Conferences № 00055. – 18 November 2019. – Vol. 298.
5. Монахов, В.А. Расчет стержневых систем с использованием графов в среде «Matlab» / В.А. Монахов, М.Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – №3.

#### References

1. Monakhov, V.A. Methodology for determining the configuration of a rod system under external influence / V.A. Monakhov, M.B. Zaitsev // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3 (44). – P. 39–45.
2. Monakhov, V.A. Algorithm for calculating the frame for stability based on a discrete model of a split rod / V.A. Monakhov, R. Sahakyan, A. Urin // Regional architecture and engineering. – 2017. – №2.
3. Kryukova, D.V. Algorithm for constructing a geometric matrix of a rod system / D.V. Kryukova, V.A. Monakhov, A.I. Shein // Internet Journal «SCIENCE STUDIES». – 2015. – Vol. 7, No. 3. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/50TVN315>
4. Monakhov, V.A. Formation of the equilibrium matrix of a rod system based on the principle of duality of problems of structural mechanics / V.A. Monakhov // Proceedings of the ICMTMTE2019 conference Sevastopol, September 12-13. MATEC Web of Conferences № 00055. – 18 November 2019. – Vol. 298.
5. Monakhov, V.A. Calculation of rod systems using graphs in the «Matlab» environment / V.A. Monakhov, M.B. Zaitsev // Modeling and mechanics of structures. – 2016. – №3.

УДК 624.01

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

**Арискин Максим Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Мартышкин Даниил Олегович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: historical95@mail.ru

**Ванин Илья Владимирович**,  
аспирант кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: ya.vanin94@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

**Ariskin Maxim Vasilievich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building Structures»  
E-mail: m.v.ariskin@mail.ru

**Martyshkin Daniil Olegovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
Structures»  
E-mail: historical95@mail.ru

**Vanin Ilya Vladimirovich**,  
Postgraduate of the department «Building  
Structures»  
E-mail: ya.vanin94@yandex.ru

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ НА ВКЛЕЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБАХ

М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин, И.В. Ванин

Определено напряженно-деформированное состояние соединений деревянных конструкций с применением клеенных стеклопластиковых шайб. Представлены результаты испытаний образцов. Показана достаточно высокая несущая способность соединения деревянных конструкций. На основании компьютерной модели была получена качественная картина распределения напряжений в образцах.

*Ключевые слова:* деревянные конструкции, соединение, стеклопластик КАСТ-В, шайба, напряженно-деформированное состояние

### STRESS-STRAIN STATE OF JOINTS ON GLUED FIBERGLASS WASHERS

M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, I.V. Vanin

Stress-strain state of joints of wooden structures using glued fiberglass washers is determined. Results of samples tests are presented. Quite high bearing capacity of wooden structures connection is shown. Based on the computer model, a qualitative picture of the stress distribution in the samples was obtained.

*Keywords:* wooden structures, connection, fiberglass KAST-V, washer, stress-strain state

#### Введение

Соединения элементов деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением вкладышей, которые вставляются, ввинчиваются, впрессовываются или клеиваются в деревянные элементы, обеспечивая передачу усилий от одного элемента другому. Такие вкладыши выполняются металлическими (гвозди, нагели, шпонки, шайбы, металлические зубчатые пластины (МЗП) и др.). Обладая достаточно большой несущей способностью, металлические рабочие вкладыши имеют существенные недостатки, одним из которых является то, что в отличие от дерева металлические вкладыши в процессе эксплуатации подвержены значительной коррозии. Это вызывает необходимость проведения дополнительных работ по защите металлических деталей от коррозии как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

Кроме того, к ряду несущих конструкций предъявляются требования немагнитности. Чистая древесина является немагнитным материалом, и наличие в ней металлических деталей в виде соединительных вкладышей нарушает это свойство. Поэтому не всегда в таких деревянных конструкциях можно использовать соединение с металлическими вкладышами.

В работе [1] предлагается соединение немагнитное, коррозионно-стойкое и вместе с тем достаточно прочное. В основу такого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на достаточно большую площадь металлического вкладыша по сравнению с размером самой связи; при этом сама связь должна быть выполнена из материала, более прочного и жесткого, чем древесина, и, кроме того, химически стойкого и немагнитного. В качестве материала шайб принят стеклопластик КАСТ-В.

#### 1. Теоретическое исследование НДС соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах

Для анализа напряженно-деформированного состояния соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах было выполнено компьютерное моделирование образцов в программном комплексе Лира-САПР.

При создании математической модели одним из главных условий является приложение нагрузок и определение типа взаимодействия элементов. Приложение нагрузок производилось согласно расчетной схеме (рис. 1), а именно: равномерно распределенная нагрузка прикладывалась непосредственно на деревянные элементы. Взаимодействие стеклопластика с древесиной осуществлялось при условии, когда рядом стоящие узлы в стеклопластиковом и деревянном элементах связываются путем объединения перемещений. Таким образом моделируются монолитность и целостность конструкции (т.е. связи, объединяющие древесину и стеклопластиковую шайбу, могут воспринимать растягивающие и сжимающие напряжения).

Наложение граничных условий заключалось в том, чтобы ограничить перемещение деревянного образца по оси  $y$  (см. рис. 1). Ограничения для шайбы с болтом не требуются.

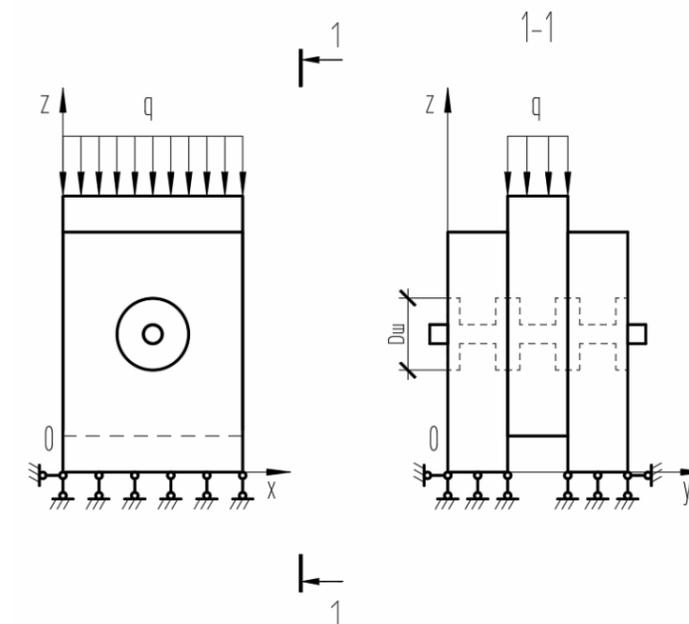


Рис. 1. Расчетная схема трехсоставного образца с передачей нагрузки на средний элемент

При расчете используются три материала: 2 ортотропных (древесина и стеклопластик) и 1 изотропный (металл).

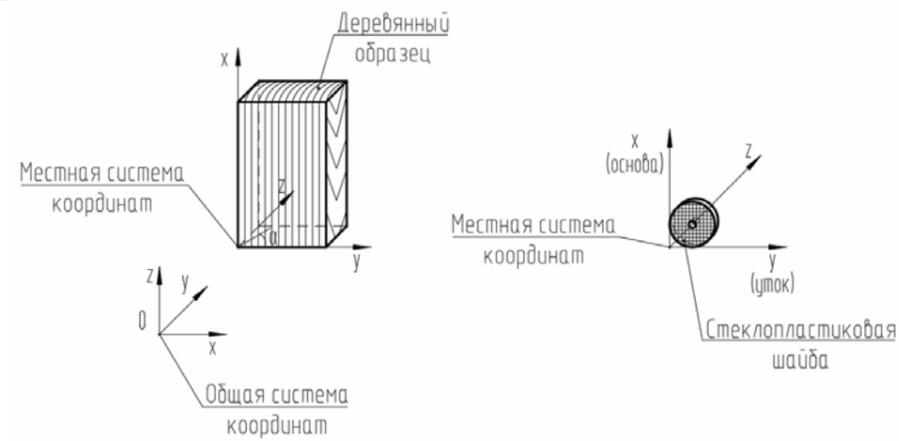


Рис. 2. Системы координат

Характеристики материалов соединения представлены в таблице.

Характеристики материалов соединения

№ п/п	Материал	Характеристики			
		Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига, МПа	Объемный вес, МН/м <sup>3</sup>
1	Металл	$E=210000$	$\mu=0,3$	-	0,0785
2	Стеклопластик КАСТ-В	$E_x=22200$ МПа $E_y=17500$ МПа $E_z=4000$ МПа	$\mu_{yx}=0,09$ $\mu_{zy}=0,11$ $\mu_{zx}=0,10$	по основе $G_{xy}=4000$ МПа по утку $G_{yx}=4000$ МПа	0,018
3	Древесина (сосна, 2-й сорт)	$E_x=16000$ МПа $E_y=1000$ МПа $E_z=500$ МПа	$\mu_{yx}=0,5$ $\mu_{zy}=0,2$ $\mu_{zx}=0,02$	$G_{xy}=1180$ МПа $G_{yz}=690$ МПа $G_{xz}=670$ МПа	0,005

Для оценки напряженно-деформированного состояния соединения была создана математическая модель, соответствующая расчетной схеме, показанной на рис. 1.

Взаимодействие стеклопластика с древесиной в данной модели рассматривалось как решение нелинейной контактной задачи (т.е. деревянный элемент работает только на сжатие под шайбой). Внешний вид модели, разбитой на сетку конечных элементов, показан на рис. 3.

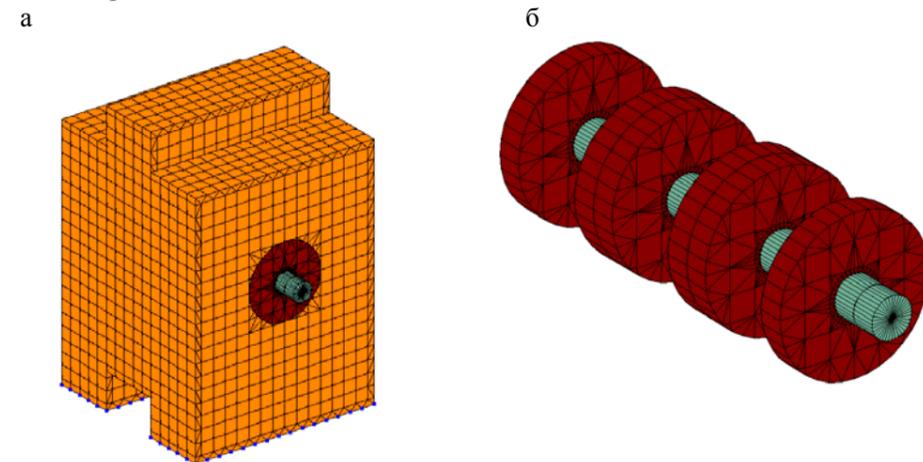


Рис. 3. Разбивка на сетку конечных элементов в Лира-САПР:  
а – трехсоставной образец; б – стеклопластиковые шайбы и стальной болт

Расчет производился в упругой стадии работы древесины при действии на средний образец силы  $q=10,4$  МПа в соответствии с экспериментальными данными. Характеристики материалов приняты по таблице.

Программный комплекс Лира-САПР позволяет выполнять операции по нахождению напряжений ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ) и перемещений  $X, Y, Z$ . Ниже приводятся изополя напряжений при действии внешней нагрузки на исследуемый образец (рис. 4–8).

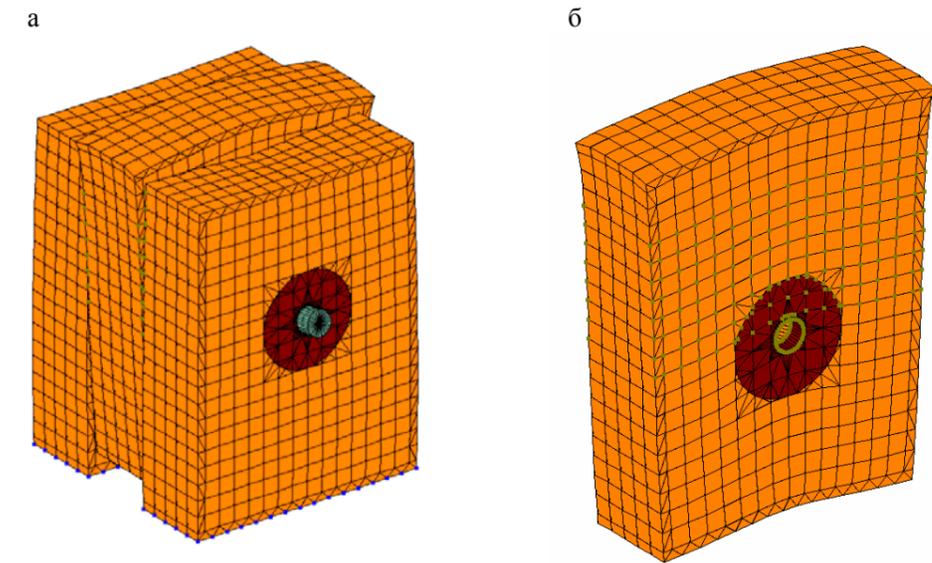


Рис. 4. Общий вид деформаций:  
а – всего образца; б – среднего элемента

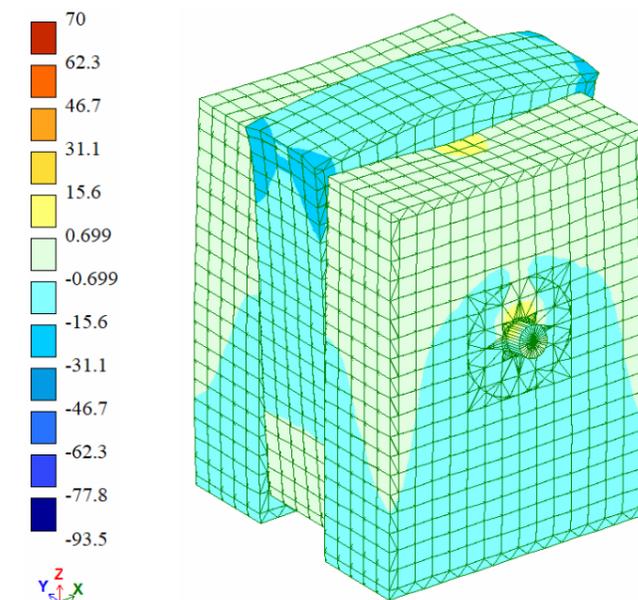


Рис. 5. Изополя напряжений образца  $\sigma_x$

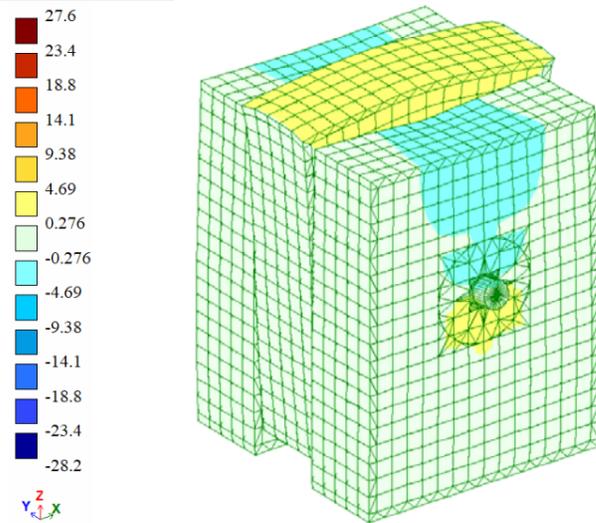


Рис. 6. Изополя напряжений образца  $\sigma_y$

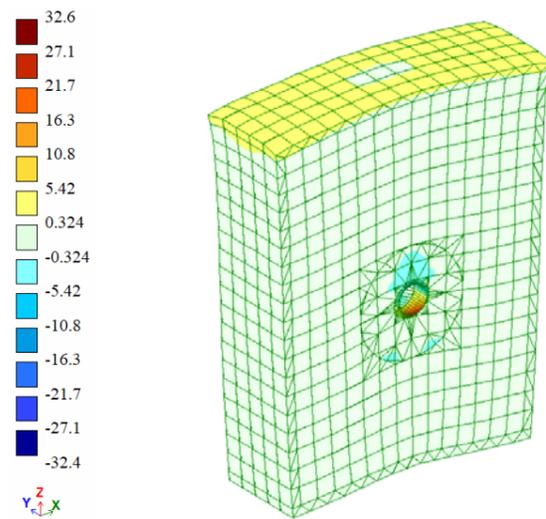


Рис. 7. Изополя напряжений среднего элемента  $\sigma_z$

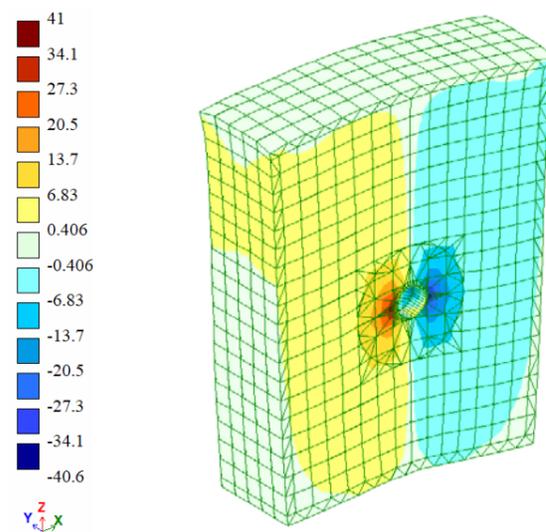


Рис. 8. Изополя напряжений среднего элемента  $\tau_{xy}$

В ходе теоретических исследований получены зависимости от параметров шайбы: шага расстановки, толщины, диаметра.

Рассматривая модели одно- и трехсоставного образцов, видим, что схемы эквивалентны друг другу. Также стоит отметить, что при увеличении  $S_1$  и  $S_3$  напряжения уменьшаются только до величины:  $3d_{ш}$  – для  $S_1$ ,  $2d_{ш}$  – для  $S_3$ . Таким образом, шаг расстановки шайб должен быть не менее этих величин

В расчете не учитывался угол наклона волокон стеклоткани в шайбах. Данный вопрос будет рассмотрен в следующих работах.

## 2. Экспериментальное исследование НДС соединений на вклеенных стеклопластиковых шайбах

Разработана методика экспериментальных исследований, которая включает определение толщины, диаметра и шага расстановки шайб.

Общий вид образца и деталей к нему показан на рис. 9.

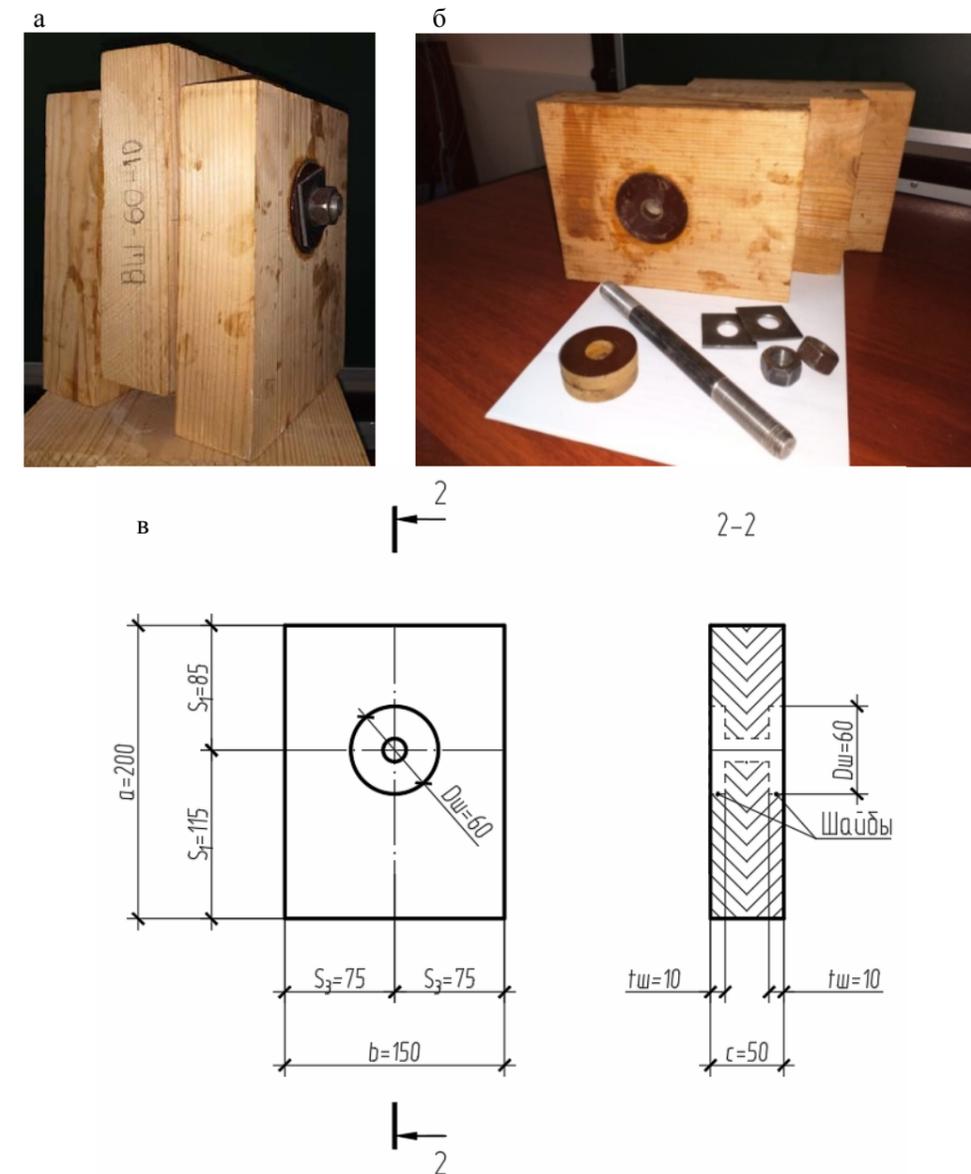


Рис. 9. Общий вид образца и его деталей:  
а – общий вид образца; б – составляющие детали образца; в – размеры образца

Заготовленные образцы были испытаны под нагрузкой. Схема испытаний показана на рис. 10.

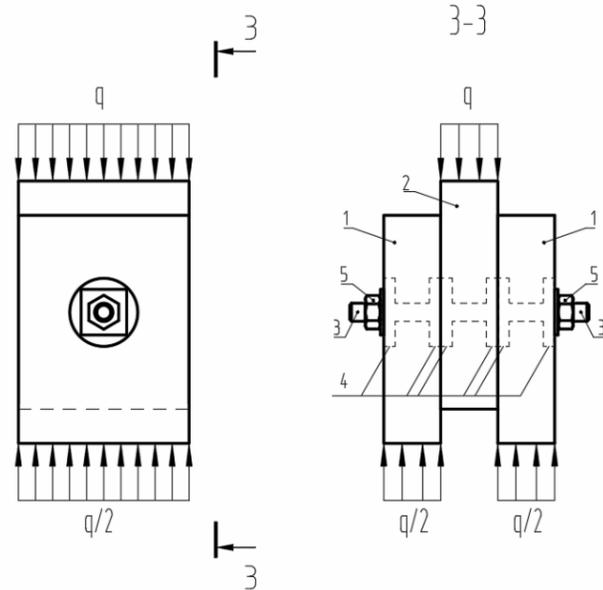


Рис. 10. Схема нагружения трехсоставного образца:  
1 – крайний элемент; 2 – средний элемент; 3 – стяжной болт;  
4 – клеенные шайбы; 5 – гайки.

Испытания проводились на электромеханическом прессе ПТС-500, предназначенном для испытания материалов на прочность при сжатии с диапазоном нагрузки от 0 до 500 кН. Нагружение образцов на клеенных шайбах осуществлялось поэтапно с величиной ступени 5 кН. Результаты испытания образцов приведены на рис. 11–13.

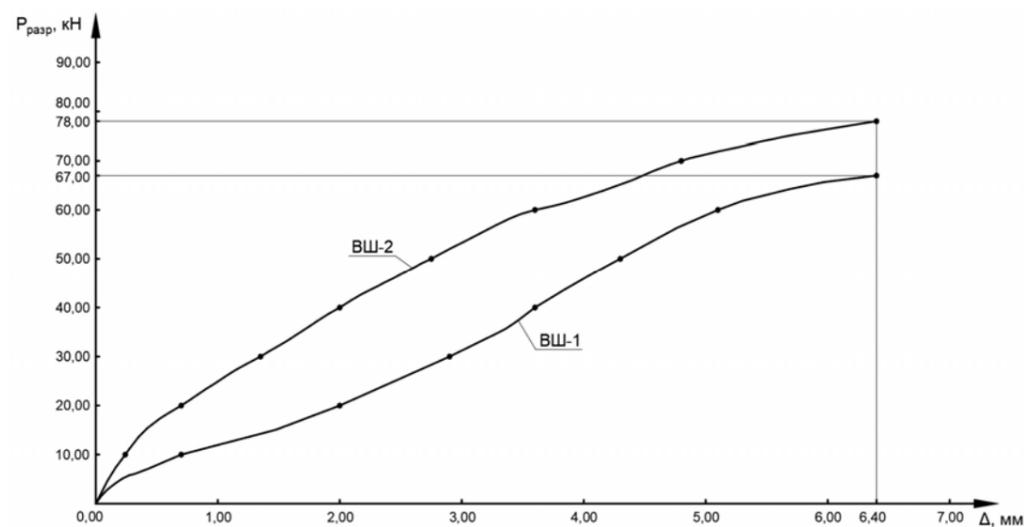


Рис. 11. Диаграмма испытаний образцов

Разрушающая нагрузка при испытании образца ВШ-1 составила 67 кН, а для образца ВШ-2 – 78 кН, максимальные перемещения при разрушающей нагрузке соответственно равны 6,40 мм.

Сравнивая эти величины с аналогичными для соединений на клеенных стальных шайбах [2], констатируем, что в соединениях на ВШ имеют место несколько пониженные величины разрушающей нагрузки. Очевидно, это связано прежде всего с

пониженными значениями прочности и модуля упругости для стеклопластика КАСТ-В по сравнению с аналогичными характеристиками для металлических шайб.

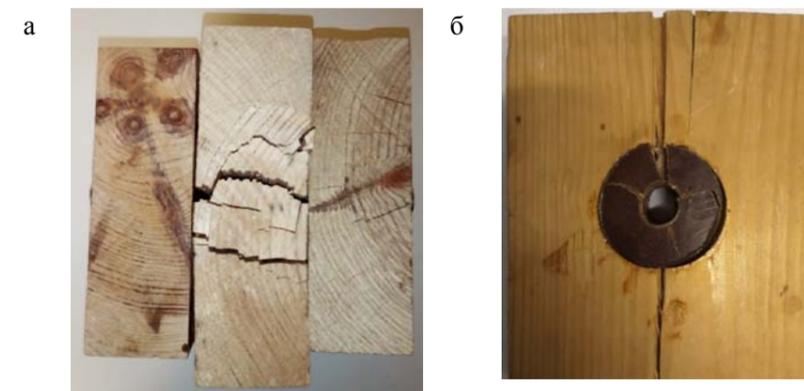


Рис. 12. Испытанный образец ВШ-1:  
а – вид сверху; б – средний элемент

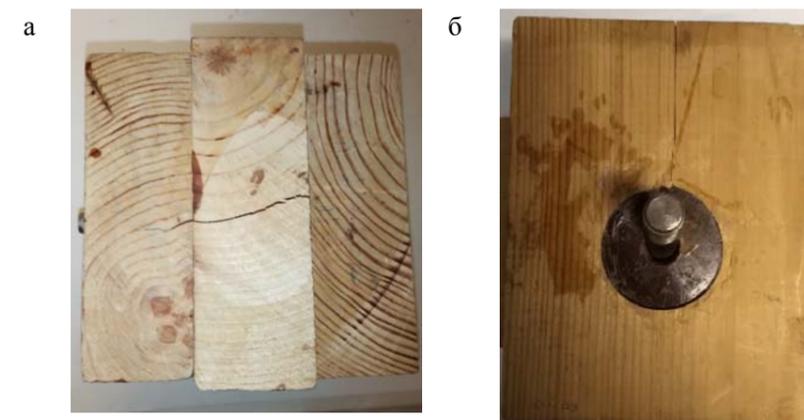


Рис. 13. Испытанный образец ВШ-2:  
а – вид сверху; б – средний элемент

Следует отметить, что теоретические предпосылки нашли свое подтверждение в ходе экспериментальных исследований. Так, на фактическую величину несущей способности испытанных соединений существенно повлиял недостаточный шаг ( $S_1$  и  $S_3$ ) расстановки шайб в соединении (особенно  $S_1$ ), что подтверждается разрушением образцов в результате раскалывания деревянных образцов на участке от торца до шайбы, т.е. на участке  $S_1$ .

#### Вывод

Напряженно-деформированное состояние соединений на клеенных шайбах из стеклопластика КАСТ-В показало достаточно высокую несущую способность данного соединения в сравнении с аналогом на клеенных металлических шайбах, а также перспективность его применения в конструкциях коррозионно-стойких и немагнитных.

#### Список литературы

1. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.

2. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.

#### References

1. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No(41). – P. 103–108.
2. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.

УДК 624.074.2.011

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

**Миряев Борис Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: miryaevbv@gmail.com

**Зотов Владимир Сергеевич**,  
студент  
E-mail: vova.zotov98@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

**Miryaev Boris Vasilyevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Building structures»  
E-mail: miryaevbv@gmail.com

**Zotov Vladimir Sergeevich**,  
Student  
E-mail: vova.zotov98@mail.ru

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛОВ ДЕРЕВЯННОГО КУПОЛА

Б.В. Миряев, В.С. Зотов

Рассматривается разработанная новая конструкция узла с полимерцементным раствором, которая повышает жесткость купола и снижает трудоемкость его изготовления. Излагаются результаты численного исследования и результаты испытаний узлов купола. Даются рекомендации по совершенствованию конструкции узлов.

*Ключевые слова: сетчатый деревянный купол, узлы, испытания, полимерцементный раствор*

### STRESS-STRAIN CONDITION OF WOODEN DOME NODES

B.V. Miryaev, V.S. Zotov

A new design of the node with polymer cement mortar has been developed, which increases the rigidity of the dome and reduces the complexity of its manufacture. The results of the numerical research and tests of the dome nodes are presented. Recommendations for improving the design of nodes are given.

*Keywords: reticulate wooden dome, residential house, node, test, polymer-cement mortar*

Сетчатые деревянные купола являются легкими эффективными конструкциями, позволяющими покрывать большие пролеты. При больших пролетах каркас таких конструкций состоит, как правило, из деревянных клееных ребер и стальных узловых соединительных деталей. Так, например, самые большие деревянные купола в мире, построенные в США, имеют деревянные клееные ребра высотой до 1 м и узловые детали в виде полых шестигранных призм, сваренных из стальных листов [1]. Другим примером аналогичной конструкции может служить модель фрагмента купола, испытанная в Уральском ГУПС [2]. Существенный недостаток такого конструктивного решения заключается в большом количестве типоразмеров узловых соединительных деталей в виде шестигранных призм. Это является следствием того, что поверхность двоякой кривизны – неразвертываемая поверхность, и поэтому ребра купола примыкают друг к другу под разными углами. Этому недостатка лишен узел с центральной узловой деталью в виде отрезка трубы. Торцы деревянных ребер имеют цилиндрическую поверхность, благодаря чему ребра могут сопрягаться друг с другом под различными углами.

Деревянные ребра с цилиндрическими торцами можно изготовить различными способами. Первый способ – обработать торцы с помощью специальных кольцевых пил или фрез. При таком способе в зоне контакта деревянного ребра и узловой соединительной детали будут возникать сравнительно большие контактные деформации древесины, которые были зафиксированы при испытаниях сжато-изгибаемых элемен-

тов [3]. Кроме того, такой способ потребует изготовления специального режущего инструмента. Второй способ – изготовление деревянных ребер с торцами, на которых установлены фасонные стальные детали. Такой способ был использован при изготовлении и испытании фрагментов модели купола на местную устойчивость [4]. Недостатками этого способа являются высокая стоимость фасонных деталей и жесткие требования к точности распиловки по длине деревянных заготовок.

Оптимальным решением является третий способ – изготовление деревянных ребер с торцами из полимерраствора (полимербетона). При таком способе изготовления на торцах деревянных ребер располагается материал более прочный, чем древесина, и одновременно значительно снижаются требования к точности распиловки деревянных заготовок, т.к. прослойка из полимерраствора (полимербетона) компенсирует неточность изготовления.

На кафедре строительных конструкций ПГУАС были выполнены численный и физический эксперименты по исследованию узлов купола с полимерцементными вставками и узловой деталью в виде трубы.

Для проведения данного исследования было изготовлено 6 фрагментов деревянных ребер с оконцовками цилиндрической формы из полимерраствора. Исследуемые деревянные ребра выполнены из сосны, сечением 20×95 мм и длиной 330 мм. Узловая деталь длиной 95 мм представляет собой отрезок трубы Ø57 мм. Формирование концевых участков ребер из полимерраствора производилось на специальном стенде. Узловая деталь и ребра фиксировались на стенде винтовыми прижимами, а поверхность детали закрывалась полиэтиленом.

Толщина полимерраствора в самой тонкой части составляла 4 мм. Полость между ребрами и узловой деталью с боковых сторон закрывалась съемными накладками. В образовавшуюся полость между торцом ребра и трубой заливался полимерраствор, который изготавливался из эпоксидного клея ЭДП «КЛАСС» и цемента в соотношении 1 часть отвердителя, 9 частей эпоксидной смолы, 8 частей белого цемента марки М400. Время полного отверждения полимерраствора составило 36 часов при  $t=17^{\circ}\text{C}$ . После схватывания полимерраствора к ребрам прикреплялись стальные накладки сечением 4×11 мм, к которым заранее были приварены шпильки с резьбой М6 (рис. 1).



Рис. 1. Узловая деталь в виде трубы и ребро с торцом цилиндрической формы

Программа исследования узлов состояла из 2-х этапов. На первом этапе были изготовлены 3 деревянных образца, к которым прикреплялись по две стальные накладки с помощью соответственно двух, трех и четырех саморезов. Около каждой накладки был установлен индикатор часового типа, который фиксировал деформации соединения. Нагрузка на образец прикладывалась ступенями в режиме «нагружение-разгрузка». Всего было принято 5 ступеней нагружения, время выдержки образца под одной ступенью 5 мин. По результатам первого этапа исследования получены зависимости вида  $P-f$ , где  $P$  – нагрузка;  $f$  – деформации (рис. 2).

На основе экспериментальных данных получены продольные жесткости стержней (длиной 30 мм), эквивалентных по жесткости соединениям на саморезах.

Для соединения на четырех саморезах продольная жесткость равна:

$$EA_4 = \frac{N \cdot l}{2 \cdot \delta_{\max,4}} = \frac{1180 \cdot 30}{2 \cdot 13 \cdot 10^{-3}} = 1360 \cdot 10^3 \text{ Н} = 1360 \text{ кН}.$$

Для соединения на трех и двух саморезах эти величины равны:  $EA_3 = 1110 \text{ кН}$ ,  $EA_2 = 681 \text{ кН}$ .

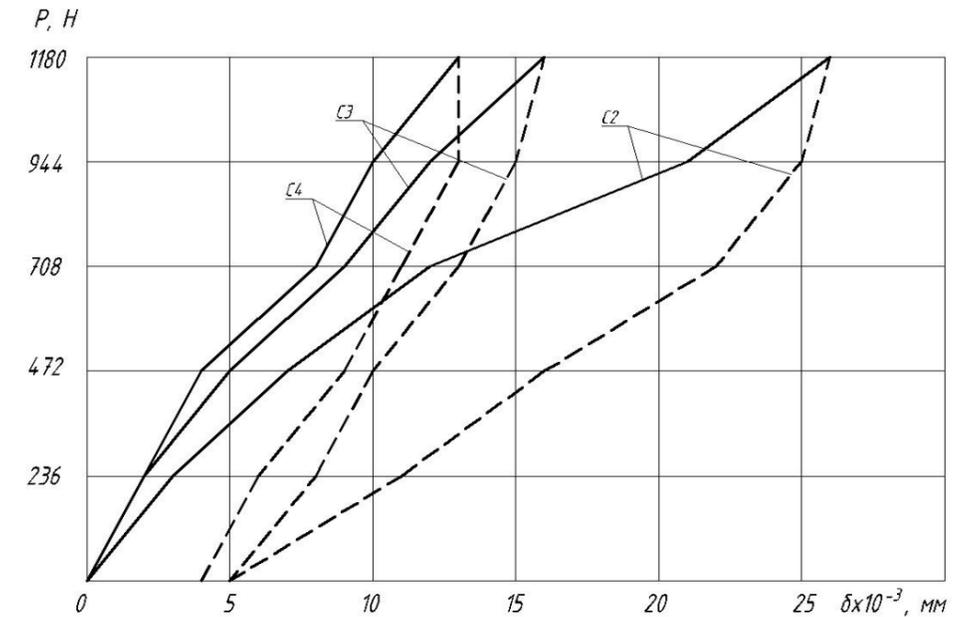


Рис. 2. Зависимости деформаций нагельных соединений от нагрузки:  
C2 – образец с двумя саморезами; C3 – образец с тремя саморезами; C4 – образец с четырьмя саморезами

Второй этап исследования узлов включал в себя численный и физический эксперименты. Численный эксперимент проводился с помощью программного комплекса «LIRA-SAPR 2013 R5» [5].

Деревянные ребра формировались из пластин с шагом триангуляции 0,01 м; данным пластинам присвоены жесткостные характеристики древесины. Соединительная деталь в виде отрезка трубы смоделирована с помощью цилиндрической поверхности вращения. В нижней растянутой зоне нагельные соединения заменялись эквивалентными по жесткости стержнями длиной 30 мм.

Алгоритм численного исследования учитывал конструктивную нелинейность и базировался на методе итераций. На первой итерации в расчетной модели закладывался минимальный зазор (трещина) высотой  $h/2$  между нижней частью ребра и узловой деталью. На последующих итерациях анализировалось напряженное состояние деревянного ребра вблизи вершины трещины. Если на каком-то участке появлялись растягивающие напряжения, то трещина увеличивалась. Итерации прекращались

после стабилизации размера трещины. Некоторые результаты исследования показаны на рис. 3, 4.

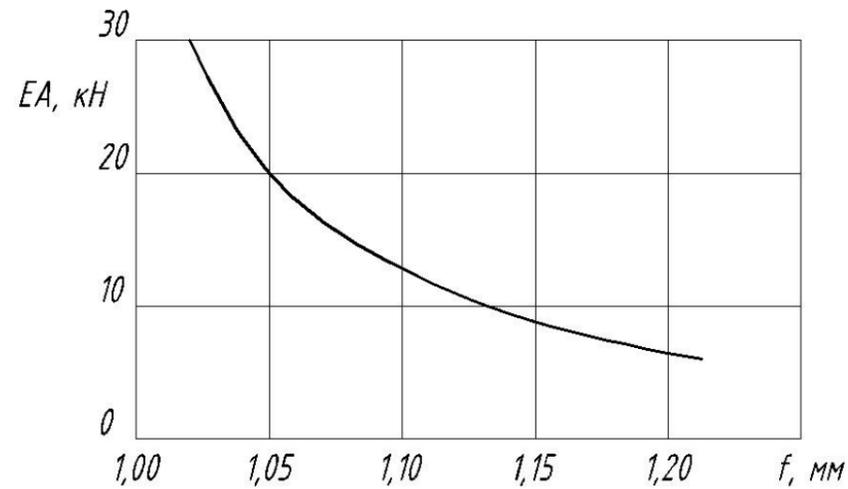


Рис. 3. Зависимость прогиба узла от жесткости нагельного соединения

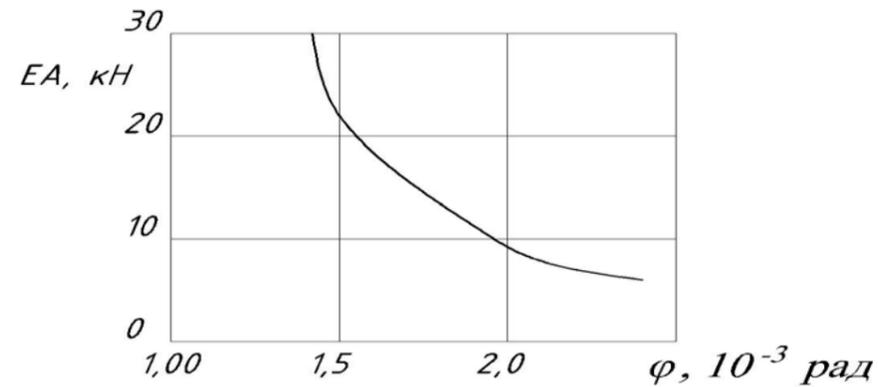


Рис. 4. Зависимость угла поворота деревянного ребра от жесткости нагельного соединения

Физический эксперимент состоял из стандартных испытаний и одного финального испытания. Все испытания проводились с помощью рычажной установки (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид узла в ходе испытания

Узлы состояли из центральной узловой детали, к которой примыкали два деревянных ребра. Деревянные ребра прикреплялись к трубе с помощью стальных накладок и приваренных к ним шпилек  $\varnothing 6$ . На шпильки внутри детали надевалась пластина с двумя отверстиями, и на шпильки навинчивались гайки.

В верхней и нижней зонах продольные деформации узла фиксировались с помощью индикаторов часового типа. Вертикальные перемещения узла измерялись с помощью прогибомера 6ПАО. Схема нагружения узла и расстановки приборов показана на рис. 6.

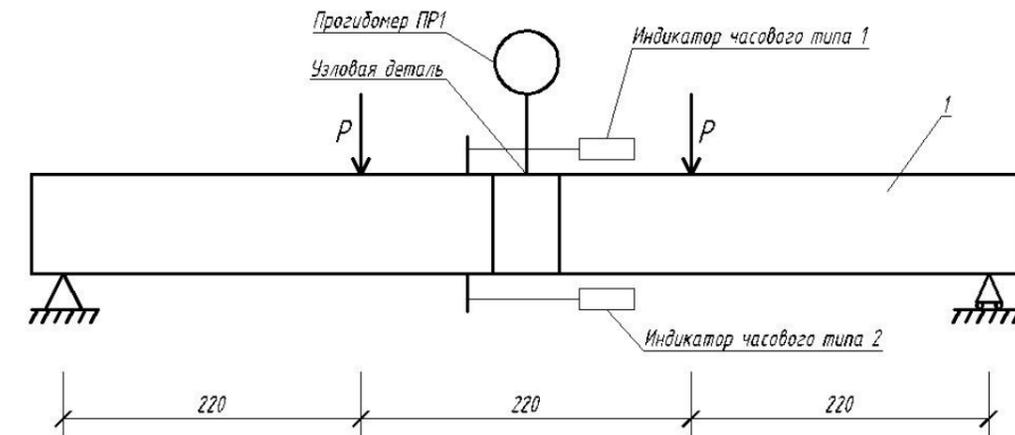


Рис. 6. Схема нагружения узла и расстановки приборов

Рядовое испытание проходило в режиме «нагрузка-разгрузка». Всего было принято 5 ступеней по 5 минут каждая.

Финальное испытание проводилось только для узла У2 ступенями до его разрушения.

Сравнение экспериментальных и теоретических величин прогибов узлов показало, что величины прогибов, полученные при испытаниях, примерно в 1,9–2,0 раза больше величин прогибов, полученных при численном расчете (рис. 7–9). Аналогичная картина наблюдается при сравнении деформаций в нижней зоне узла. Увеличенные значения экспериментальных данных по сравнению с теоретическими обусловлены следующими причинами:

1. Повышенная деформация узла в зоне контакта вертикальной пластины прямоугольного сечения и внутренней цилиндрической поверхности трубы.

Учесть этот фактор в численном расчете практически невозможно, т.к. решающую роль в нем играют случайные несовершенства, вызванные неточностью изготовления.

Значительно снизить влияние этого фактора можно, изменив форму поперечного сечения пластины.

2. Повышенная деформация узла, вызванная изгибом пластины. Учесть этот фактор в расчете можно было за счет более точного моделирования узла, что, несомненно, значительно повысило бы трудоемкость расчета.

3. Повышенная деформация узла, вызванная деформацией болтового соединения.

4. Дополнительное вертикальное перемещение узла, вызванное обмятием древесины на опорах. Значительно уменьшить влияние этого фактора можно было бы за счет постановки дополнительных приборов, фиксирующих осадку опор.

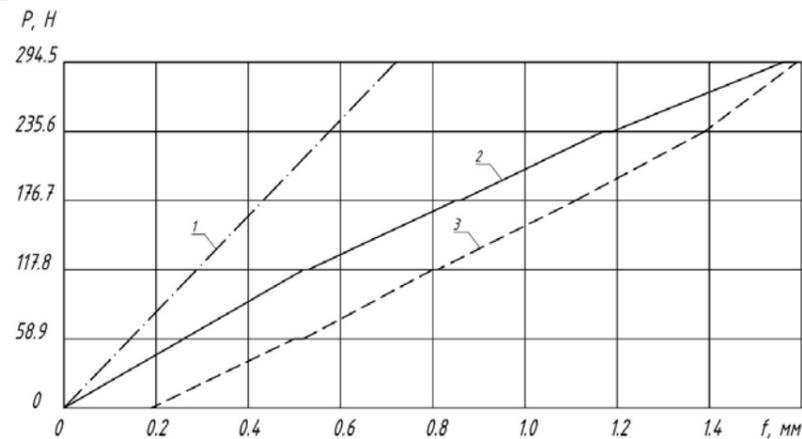


Рис. 7. Зависимости прогиба узла У-2 от нагрузки, полученные по результатам испытания и расчета:

1 – расчет; 2 – стадия нагружения при испытании; 3 – стадия разгрузки при испытании

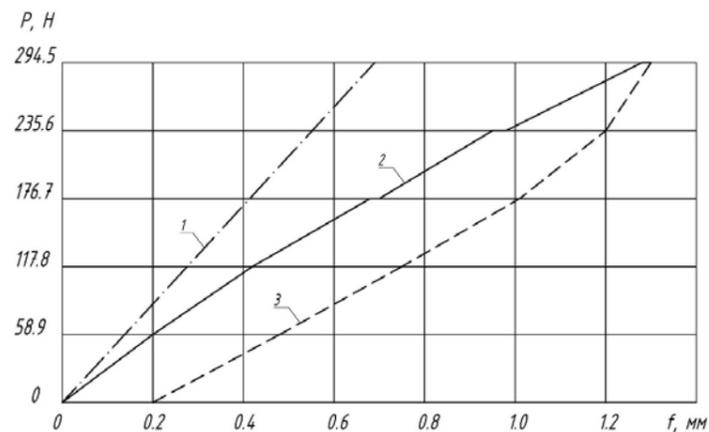


Рис. 8. Зависимости прогиба узла У-3 от нагрузки, полученные по результатам испытания и расчета:

1 – расчет; 2 – стадия нагружения при испытании; 3 – стадия разгрузки при испытании

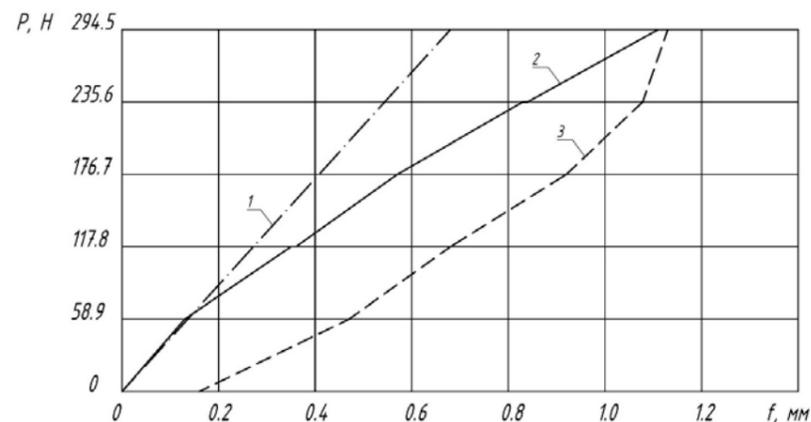


Рис. 9. Зависимости прогиба узла У-4 от нагрузки, полученные по результатам испытания и расчета:

1 – расчет; 2 – стадия нагружения при испытании; 3 – стадия разгрузки при испытании

### Выводы

1. Прогибы и деформации узла, полученные в ходе испытаний, в 1,9–2 раза превышают прогибы и деформации, полученные из численного эксперимента.
2. Для снижения деформации узла необходимо внести коррективы в конструкцию узлового соединения, в частности:
  - а) повысить жесткость детали, с помощью которой ребро присоединяется к трубе;
  - б) уменьшить деформации узла за счет использования клеенных стержней.
3. Применение данных узлов позволяет значительно уменьшить трудоемкость изготовления и монтажа купола, поэтому необходимо продолжить исследование данных усовершенствованных конструкций.

### Список литературы

1. Миряев, Б.В. Деревянные купольные покрытия стадионов / Б.В. Миряев, В.С. Зотов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. XX Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2020. – С. 96–99.
2. Таскин, И.А. Экспериментальное исследование конструкции шестигранной ячейки сетчатого купола / И.А. Таскин // Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2016. – №7 (49). – Ч. 2.
3. Миряев, Б.В. Экспериментально-теоретические исследования сжато-изгибаемых деревянных элементов купола в предельном состоянии / Б.В. Миряев, С.А. Толушов // Изв. вузов. Строительство. – 2014. – №1. – С. 108–116.
4. Миряев, Б.В. Определение критической нагрузки при местной потере устойчивости сетчатых деревянных куполов / Б.В. Миряев, А.А. Кузнецов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №1. – С. 90–98.
5. Миряев, Б.В. Численное исследование узла деревянного купола / Б.В. Миряев, В.С. Зотов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2021. – С. 78–81.

### References

1. Miryaev, B.V. Wooden dome coverings of stadiums / B.V. Miryaev, V.S. Zotov // Effective building designs: theory and practice: digest of articles of the XX international scientific-technical conference. – Penza: PGUAS, 2020. – P. 96–99.
2. Taskin, I.A. Experimental research of the design of a hexagonal mesh dome cell / I.A. Taskin // International scientific research journal. – №7 (49). – Part 2.
3. Miryaev, B.V. Experimental and theoretical research of compressed-bent wooden elements of a dome in the limit state / B.V. Miryaev, S.A. Tolyshov // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2014. – №1. – P. 108–116.
4. Miryaev, B.V. Determination of the critical load at local loss of stability of mesh wooden domes / B.V. Miryaev, A.A. Kuznetsov // Regional architecture and engineering. – 2016. – №1. – P. 90–98.
5. Miryaev, B.V. Numerical research of a wooden dome node / B.V. Miryaev, V.S. Zotov // Effective building structures: theory and practice: digest of articles of the XXI international scientific-technical conference. – Penza: PGUAS, 2021. – P. 78–81.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ENGINEERING SYSTEMS

УДК 66.071.6

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
тел.: (8412) 56-35-11; факс: (8421) 56-51-22

**Лебединский Константин Валерьевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Транспортные машины»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Андреев Виктор Сергеевич**,  
студент

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

Penza State University  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 56-35-11;  
факс: (8421) 56-51-22

**Lebedinskiy Konstantin Valerevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
department «Transport Machines»  
E-mail: Lebedinskiy\_K@mail.ru

**Andreev Viktor Sergeevich**,  
Student

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА КИСЛОРОД И АЗОТ В ВЫСОКОГРАДИЕНТНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ МИКРОЦИКЛОНА

С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона. Установлено, что микроциклон с камерой сепарации, имеющей радиус  $r_0=1\cdot 10^{-3}$  м и длину  $l_K=40\cdot 10^{-3}$  м, при величине давления воздуха на входе в аппарат  $P_H=0,7$  МПа может обеспечивать величину коэффициента разделения  $K_p=1,31$  и повысить концентрацию кислорода на выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси до значения  $C_{кр}=349,7$  гр/м<sup>3</sup>. Показано, что использование принципов вихревой микрофлюидики позволяет создать высокоградиентное центробежное поле за счет уменьшения геометрических размеров центробежного аппарата, что приводит к возможности получения обогащенной кислородом газовой смесей из воздуха и обеспечивает существенное снижение себестоимости аппарата.

*Ключевые слова:* центробежное поле, коэффициент разделения, микроциклон, критерий Фруда, градиент концентрации кислорода

## LABORATORY STUDIES OF THE PROCESS OF AIR SEPARATION INTO OXYGEN AND NITROGEN IN THE HIGH-GRADIENT CENTRIFUGAL FIELD OF A MICROCYCLE

S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, V.S. Andreev

The results of experimental studies of the process of air separation into oxygen and nitrogen in the high-gradient centrifugal field of a microcycle are presented. It is established that a microcyclone with a separation chamber having a radius  $r_0=1\cdot 10^{-3}$  m and length  $l_K=40\cdot 10^{-3}$  m at the value of air pressure at the inlet to the apparatus  $P_H=0.7$  MPa can provide the value of the separation coefficient  $K_p=1.31$  and increase the oxygen concentration at the outlet of the outlet of the oxygen-enriched gas mixture to the value  $C_{кр}=349.7$  g/m<sup>3</sup>. It is shown that the use of the principles of vortex microfluidics makes it possible to create a highly gradient centrifugal field by reducing the geometric dimensions of the centrifugal apparatus, which leads to the possibility of implementing the process of obtaining oxygen-enriched gas mixtures from the air and provides a significant reduction in its cost.

*Keywords:* centrifugal field, separation coefficient, microcyclone, Froude criterion, oxygen concentration gradient

В настоящее время широкое распространение получили методы разделения эмульсий и суспензий в аппаратах, создающих действующее поле центробежных сил, величина которых в сотни и тысячи раз превышает величину силы тяжести. По конструктивным признакам аппараты, создающие поле центробежных сил, подразделяются на центрифуги и циклоны. В центрифугах вращательное движение, разделяемому потоку передается действием сил вязкого трения от вращающегося с большой скоростью ротора. В циклонах оно обеспечивается скоростным напором потока, поступающего на разделение через тангенциально присоединенный к камере сепарации входной патрубком, в результате чего возникает вращательный момент сил, обеспечивающий вращательно-поступательное движение разделяемого потока.

В 30-х годах XX века впервые стали появляться научные статьи, рассматривающие возможность использования роторных центрифуг для разделения воздуха на азот и кислород. В 1937 году вышла статья Ю.Б. Харитона «К вопросу разделения газов центрифугированием», в которой он выполнил аналитический обзор литературных источников, посвященных этой проблеме.

В своей статье Ю.Б. Харитон сделал теоретический вывод о близости к обратимому процессу механизма молекулярно-диффузионного разделения компонентов воздушной смеси, имеющих различную плотность. Его расчеты показали, что идеальный обратимый процесс получения 1 м<sup>3</sup> чистого кислорода из 5 м<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях потребует лишь 0,09 кВт·ч энергии.

Несмотря на теоретические предпосылки, Ю.Б. Харитоном также был сделан вывод о нецелесообразности практического внедрения технологии разделения воздуха на кислород и азот в роторной центрифуге ввиду крайне низкого значения скорости процесса принудительной молекулярной диффузии в создаваемом ей низкоградиентном центробежном поле.

Основной технологической характеристикой, определяющей эффективность процесса разделения газовой смеси в центробежном поле роторной центрифуги (процесса принудительной газовой диффузии), является коэффициент разделения, величина которого определяется по формуле, приводимой в работах [1, 2]:

$$K_p = \frac{C_{r_n}}{C_{r_o}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_n) r_o^2}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_n) \cdot \omega^2 \cdot r_o^2}{2RT}}, \quad (1)$$

где  $C_{r_n}$  и  $C_{r_o}$  – соответственно концентрации отделяемого из воздуха кислорода: на периферии центрифуги ( $y$  поверхности ротора) и на оси центрифуги;  $\mu_k$  и  $\mu_n$  – соответственно молекулярные массы кислорода ( $\mu_k=0,0320$  кг/моль) и воздуха

( $\mu_b = 0,0288$  кг/моль);  $R$  – газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/кг);  $r_0$  – радиус ротора центрифуги, м;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $c^{-1}$ ;  $V_0$  – окружная (тангенциальная) скорость вращения потока газовой смеси в пристеночном слое ротора, м/с;  $T$  – температура потока газовой смеси, °К.

Формула (1) позволяет определять величину конечного распределения компонентов газовой смеси по радиусу ротора центрифуги, возникающего в случае, когда время нахождения потока газовой смеси в аппарате достаточно для наступления состояния динамического равновесия.

Величина центробежной силы, действующей в пристеночной области центробежного аппарата на объем газовой смеси, равной одному молю  $W_\mu$ ,  $m^3$ , может быть определена по формуле

$$F_{ц} = \Delta\rho \cdot W_\mu \cdot a_{ц} = \Delta\mu \cdot a_{ц} = (\mu_k - \mu_b) \omega^2 r_o^2, \text{ Н/моль}, \quad (2)$$

где  $\Delta\mu$  – разница молекулярных масс кислорода и воздуха, кг/моль;  $\Delta\rho$  – разность величин плотностей разделяемой газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>,

$$\Delta\rho = \frac{\Delta\mu}{W_\mu} = \frac{\mu_k - \mu_b}{W_\mu}, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

$a_{ц}$  – ускорение центробежной силы  $F_{ц}$ , м/с<sup>2</sup>,

$$a_{ц} = \omega^2 r_o, \text{ м/с}. \quad (4)$$

В реальности объем ротора центрифуги  $W_{ц}$  не равен объему одного моля газовой смеси  $W_\mu$ .

С учетом формулы (2) формула (1) может быть записана в виде

$$K_p = e^{\frac{F_{ц} \cdot r_o}{2RT}}. \quad (5)$$

В формуле (5) величина коэффициента распределения газовой смеси в центробежном поле, создаваемом при вращении ротора центрифуги  $K_p$ , зависит от произведения величины центробежной силы  $F_{ц}$  на величину радиуса ротора  $r_o$ , м.

В соответствии с формулой (5) при достаточно большой величине радиуса ротора  $r_o$  малая величина центробежной силы обеспечит существенное значение коэффициента распределения  $K_p$ , что противоречит физическим основам процесса сепарации газовой смеси в поле действия центробежных сил.

Данное противоречие может быть устранено, если принять допущение, что процесс принудительной газовой диффузии комплексов смеси под действием центробежного поля происходит не в объеме реального ротора  $W_r$ ,  $m^3$ , а в некотором теоретическом роторе объемом один моль  $W_\mu$ ,  $m^3$ /моль, имеющем высоту, равную высоте ротора центрифуги  $l_{ц}$ , м, а в пристеночной области этого ротора действует центробежная сила  $F_{ц}$ , Н, которая уравновешивается силой давления теплового движения молекул смеси  $F_d$ , Н (рис. 1).

Величину силы давления теплового движения молекул газовой смеси на вертикальные стенки теоретического цилиндра объемом один моль  $W_\mu$  высотой  $l_{ц}$  и радиусом  $r_\mu$  можно определить по формуле

$$F_d = P \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц}, \text{ Н/моль}, \quad (6)$$

где  $P$  – величина давления теплового движения молекул газовой смеси в пристеночной области рассматриваемого цилиндра, Па.

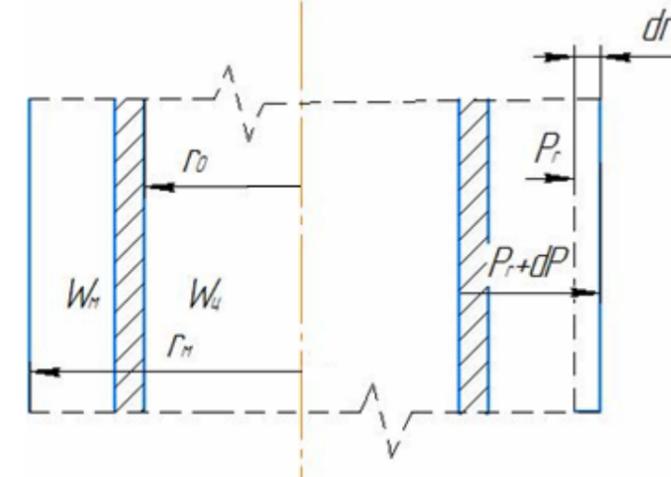


Рис. 1. Схема к описанию процесса протекания принудительной молекулярной диффузии в газовой смеси под действием центробежного поля

Из уравнения Менделеева – Клайперона имеем

$$R \cdot T = P \cdot W_\mu, \text{ Дж/моль}, \quad (7)$$

и

$$P = RT / W_\mu, \text{ Па}; \quad (8)$$

подставляя (8) в (6), получим

$$F_d = \frac{RT}{W_\mu} \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц} = \frac{RT}{\pi r_\mu^2 l_{ц}} \cdot 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц} = \frac{2RT}{r_\mu}, \text{ Н/моль}. \quad (9)$$

В пристеночной области теоретического цилиндра на расстоянии  $r_\mu$  от его оси (см. рис. 1) можно выделить тонкий кольцевой слой газовой смеси, имеющий толщину  $dr$ .

Величина давления газовой смеси, возникающего под действием центробежной силы  $F_{ц}$  на поверхности теоретического цилиндра, имеющего площадь  $S_\mu = 2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц}$ ,  $m^2$ , будет иметь значение

$$P = \frac{F_{ц}}{S_\mu} = \frac{\Delta\mu \cdot a_{ц}}{S_\mu} = \frac{\Delta\rho \cdot W_\mu \cdot a_{ц}}{S_\mu} = \frac{\Delta\rho \cdot \pi r_\mu^2 \cdot l_{ц} \cdot a_{ц}}{2\pi \cdot r_\mu \cdot l_{ц}} = \frac{\Delta\rho \cdot a_{ц} \cdot r_\mu}{2}, \text{ Па}. \quad (10)$$

В выделенном кольцевом слое газовой смеси на расстоянии  $dr$  от вертикальной поверхности теоретического цилиндра давление в газовой смеси уменьшается на величину

$$dP = \frac{\Delta\rho \cdot a_{ц}}{2} dr, \text{ Па}. \quad (11)$$

С учётом уравнения Менделеева – Клайперона (7) формула (3) запишется в виде

$$\Delta\rho = \frac{\Delta\mu}{W_\mu} = \frac{P \cdot \mu}{RT}, \text{ кг/м}^3. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), имеем

$$dP = \frac{P \cdot \Delta\mu \cdot a_{ц}}{2RT} dr, \text{ Па}. \quad (13)$$

Разделяя переменные в уравнении (13) и проводя интегрирование, принимая допущение о том, что величина ускорения центробежной силы имеет постоянное среднеедействующее значение  $a_{ц}$ , м/с<sup>2</sup>, получим

$$\int_{dP=P_0}^{P_{r_\mu}} \frac{dP}{P} = \int_{dr=0}^{r_\mu} \frac{\mu_k - \mu_b}{2RT} \cdot a_{ц} \cdot dr; \quad (14)$$

$$\ln \frac{P_{r_\mu}}{P_0} = \frac{\mu_k - \mu_b}{2RT} \cdot a_{ц} \cdot r_\mu; \quad (15)$$

$$K_p = \frac{P_{r_\mu}}{P_0} = e^{\frac{\mu_k - \mu_b}{2RT} \cdot a_{ц} \cdot r_\mu}, \quad (16)$$

где  $P_0$  и  $P_{r_\mu}$  – соответственно давление в газовой смеси на оси теоретического цилиндра и на его периферийной области.

Принимая допущение о том, что величина среднедействующего значения ускорения центробежной силы в уравнении (16) может быть определена по формуле (4), получим:

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) \cdot \omega^2 \cdot r_0 \cdot r_\mu}{2RT}} = e^{\frac{F_{ц} \cdot r_\mu}{2RT}} = e^{\frac{F_{ц}}{E_d}}. \quad (17)$$

Таким образом, показатель степени в формуле (17) является отношением величины центробежной силы  $F_{ц}$ , действующий на один моль газовой смеси, к величине силы давления теплового движения молекул газа  $F_d$  на вертикальные стенки теоретического цилиндра объёмом один моль и высотой, равной высоте ротора центрифуги  $l_{ц}$  в терминах динамики, или отношением величины работы, совершаемой центробежной силой  $F_{ц}$  при перемещении разности молекулярных масс разделяемых компонентов газовой смеси  $\Delta\mu$  на расстояние  $\frac{r_\mu}{2}$ , ( $E_{ц} = F_{ц} \cdot \frac{r_\mu}{2}$ , Дж/моль), к величине удельной энергии давления теплового движения молекул одного моля газовой смеси  $E_d = RT$ , Дж/моль, в терминах термодинамики.

В уравнении (17) в отличие от формул (1) и (5) величина коэффициента разделения  $K_p$  зависит от значения центробежной силы  $F_{ц}$  и геометрического параметра ротора центрифуги

$$r_\mu = \sqrt{\frac{W_\mu}{\pi \cdot l_{ц}}}, \text{ м}, \quad (18)$$

являющегося функцией его длины в степени  $1/2$ ,  $r_\mu = f\left(l_{ц}^{\frac{1}{2}}\right)$ .

Формула (17) также может быть представлена в виде

$$K_p = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) V_{г0}^2 \cdot r_\mu}{2RT}} = e^{\frac{(\mu_k - \mu_b) V_{г0}^2 \cdot r}{2RT}}. \quad (19)$$

Уравнение (19) отличается от формулы (1) лишь наличием безразмерного параметра  $\bar{r}$ , определяемого по формуле (20) и характеризующего конструктивные особенности ротора центрифуги:

$$\bar{r} = \frac{r_\mu}{r_0}. \quad (20)$$

В работе [1] приводится описание промышленной центрифуги DMS-1, используемой для разделения изотопов газовой смеси при температуре  $T = 318^\circ\text{K}$ , имеющей параметры ротора: длина  $l_{ц} = 1,5$  м, радиус  $r_0 = 0,06$  м.

Величина объёма одного моля газовой смеси при температуре  $T = 318^\circ\text{K}$  имеет значение

$$W_\mu = 0,0224 \frac{318}{273} = 0,026 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}. \quad (21)$$

Ротор центрифуги DMS-1 имеет величину геометрического параметра

$$r_\mu = \sqrt{\frac{W_\mu}{\pi \cdot l_{ц}}} = \sqrt{\frac{0,026}{3,14 \cdot 1,5}} = 0,07, \text{ м} \quad (22)$$

Безразмерный параметр центрифуги DMS-1 имеет значение

$$\bar{r} = \frac{r_\mu}{r_0} = \frac{0,07}{0,06} = 1,17. \quad (23)$$

Для величины коэффициента разделения  $K_p = 1,05$ , рассчитанного по формуле (1), относительная разность значений  $K_p$ , рассчитанных по формуле (1) и по формуле (19), при  $\bar{r} = 1,17$  не превышает величины  $\Delta = 1\%$ , что вполне допустимо при проведении инженерных расчетов.

Формула (20) может быть представлена в виде

$$\bar{r} = \frac{r_\mu}{r_0} \cdot \frac{2\pi l_{ц} F_{ц}}{2\pi l_{ц} F_{ц}} = \frac{P_{r_0}}{P_\mu}. \quad (24)$$

Из формулы (24) следует, что безразмерный параметр, характеризующий конструктивные особенности ротора центрифуги  $\bar{r}$ , является отношением величины давления центробежной силы оказываемого на вертикальные стенки ротора центрифуги  $P_{r_0}$ , Па, к величине давления  $P_\mu$ , Па, центробежной силы оказываемого на стенки вертикального цилиндра имеющего объём один моль  $W_\mu$  и высоту, равную высоте ротора  $l_{ц}$ .

Анализируя формулу (19), можно сделать вывод о том, что уменьшение величины радиуса ротора центрифуги позволяет существенно интенсифицировать ее работу и увеличить значение коэффициента разделения.

В работе [2] были представлены результаты теоретических исследований, свидетельствующие о том, что существенное уменьшение радиуса камеры сепарации  $r_0$  может позволить при требуемой величине фактора разделения газовой смеси в центробежном поле (критерия Фруда  $Fr$ ) обеспечить ламинарный режим ее вращательно-поступательного движения, в результате чего становится возможным использование для разделения газовой смеси устройства с неподвижной камерой смещения – микроциклона.

Лабораторная апробация нового технологического приема разделения воздуха на азот и кислород в микроциклоне – устройстве, создающем высокоградиентное центробежное поле за счет реализации принципа вихревой микрофлюидики, была проведена на установке, схема которой представлена на рис. 2.

Общий вид микроциклона 4, датчика кислорода 5 и кислородомера 6 представлен на рис. 3.

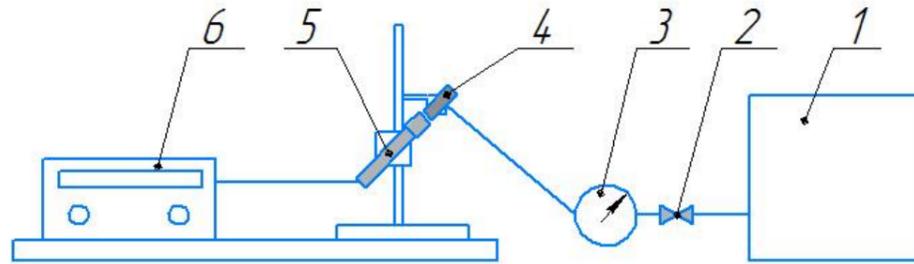


Рис. 2. Схема лабораторной установки для изучения процесса разделения воздуха на кислород и азот в микроциклоне:

1 – компрессор; 2 – вентиль для регулирования давления воздуха; 3 – манометр, 4 – микроциклон; 5 – датчик кислородомера; 6 – кислородомер



Рис. 3. Общий вид микроциклона, датчик кислородомера и кислородомер

Установка работала следующим образом. Сжатый воздух компрессором 1 подавался во входной патрубке, тангенциально присоединенный к камере сепарации микроциклона 4. Давление сжатого воздуха регулировалось вентилем 2 и контролировалось манометром 3.

Камера сепарации микроциклона 4 имела радиус  $r_0=1 \cdot 10^{-3}$  и длину  $l_k=40 \cdot 10^{-3}$  м.

На выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси устанавливался датчик кислородомера 5, соединенный кабелем с кислородомером 6.

Окружающий воздух имел температуру  $T = 295^\circ\text{K}$ .

Один моль воздушной смеси при нормальном давлении имел объем

$$W_\mu = 0,0224 \frac{295}{273} = 0,0242 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}, \text{ концентрация кислорода в воздушной смеси}$$

$$\text{составляла } C_{K_0} = 266,9 \frac{\text{гп}}{\text{м}^3}.$$

В таблице представлены значения концентрации кислорода  $C_{K_p}, \frac{\text{гп}}{\text{м}^3}$ , зафиксированные кислородомером 6 на выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси при различных величинах избыточного давления потока сжатого воздуха, подаваемого в микроциклон  $P_{\text{и}}$ , и величинах коэффициентов разделения воздуха, рассчитанных по формуле (25).

$$K_p = \frac{C_{K_p}}{C_{K_0}}. \quad (25)$$

Технические характеристики процесса разделения воздуха в микроциклоне на кислород и азот

Величины давления воздуха на входе $P_{\text{и}}$ , МПа	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Концентрация кислорода в газовой смеси на выходе из отводного отверстия обогащенной смеси $C_{K_p}$ , гп/м <sup>3</sup>	270,3	275,8	281,8	293,2	311,6	321,8	349,7
Коэффициент разделения воздуха в микроциклоне $K_p$	1,01	1,03	1,06	1,10	1,17	1,21	1,31
Теоретическая величина тангенциальной скорости потока в пристеночной области микроциклона $V_p$ , м/с	5,9	10,2	14,3	18,2	23,4	25,8	30,7
Теоретические значения критерия Фруда $Fr$	3552	10616	20866	33800	55874	67922	96172
Теоретическая величина коэффициента гидравлического сопротивления микроциклона, $\zeta$	4788	3204	2445	2013	1522	1502	1238

Также в таблице представлены значения:

– теоретической величины тангенциальной скорости потока в пристеночной области микроциклона  $V_p$ , м/с, вычисленные по формуле (26), полученной из формулы (19) с учетом допущения о том, что средняя величина давления газа в микроциклоне равна атмосферному давлению, а безразмерный параметр имеет значение  $\bar{r} = 439$ :

$$V_p = \sqrt{\frac{2 \cdot RT \cdot \ln(K_p)}{(\mu_k - \mu_b) \bar{r}}}; \quad (26)$$

– критерия Фруда  $Fr$ , вычисленные по формуле (27):

$$Fr = \frac{V_p^2}{g \cdot r_0}; \quad (27)$$

– коэффициента гидравлического сопротивления микроциклона  $\zeta$ , вычисленные по формуле (28):

$$\zeta = \frac{P_{\text{и}}}{\rho_b \frac{r}{2}}, \quad (28)$$

где  $\rho_b = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при атмосферном давлении.

В соответствии с данными, представленными в [3], величина коэффициента гидравлического сопротивления промышленного циклона ЦН-11, имеющего  $d=450$  мм, достигает величины  $\zeta=250$ .

Полученные экспериментальные данные, представленные в таблице, показывают, что микроциклон с камерой сепарации, имеющий радиус  $r_0=1 \cdot 10^{-3}$  м и длину  $l_k=40 \cdot 10^{-3}$  м, при величине давления воздуха на входе в циклон  $P_{\text{и}}=0,7$  МПа может обеспечить величину коэффициента разделения  $K_p=1,31$  и повысить концентрацию на выходе из отводного отверстия обогащенной кислородом газовой смеси до значения  $C_{K_p}=349,7 \text{ гп/м}^3$ .

Использование принципов вихревой микрофлюидики, предусматривающей создание высокоградиентного центробежного поля за счет уменьшения геометрических размеров центробежного аппарата, позволит реализовать технологический процесс разделения воздуха на кислород и азот в центробежном аппарате с неподвижной камерой сепарации и обеспечить существенное снижение его себестоимости.

#### Список литературы

1. Kemp R. Scott. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P 1–19.
2. Андреев, С.Ю. Новая технология интенсификации процесса разделения газовых смесей в центробежном поле за счет уменьшения размера центробежных аппаратов / С.Ю. Андреев, К.В. Лебединский, В.С. Андреев // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – №3 (48). – С. 167–175.

#### References

1. Kemp R. Scott. Gas centrifuge theory and Development / Kemp R. Scott. // Science and Global security. – 2009. – Vol. 17. – P 1–19.
2. Andreev, S.Yu. New technology for intensifying the process of separation of gas mixtures in a centrifugal field by reducing the size of centrifugal apparatuses / S.Yu. Andreev, K. V. Lebedinskiy, V.S. Andreev // Regional architecture and engineering. – 2021. – №3 (48). – P. 167–175.

УДК 628.3

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

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Ласьков Николай Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Пензенский государственный  
технологический университет

Россия, 440039, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11,  
тел. (8412) 49-54-41; факс (8412) 49-60-86

**Яхкин Михаил Ильич**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдела  
научных исследований  
E-mail: yah@sura.ru

Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие "Рубин"»

Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,  
тел.: +7-8412-20-48-08

**Князев Владимир Александрович**,  
кандидат технических наук,  
инженер 1-й категории

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

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Laskov Nikolay Nikolaevich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Building Structures»  
E-mail: stroyconst@pguas.ru

Penza State Technological University

Russia, 440039, Penza,  
1A / 11 Baidukova / Gagarin St.,  
tel. (8412) 49-54-41; fax (8412) 49-60-86

**Yakhkind Michael Il'ich**,  
Candidate of Sciences, Senior Researcher of  
Scientific Research department  
E-mail: yah@sura.ru

Joint Stock Company «Research And  
Production Enterprise Rubin»

Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,  
tel: + 7-8412-20-48-08

**Knyazev Vladimir Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences,  
1st Category Engineer

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СИСТЕМЫ «ВОДА – ВОЗДУХ»

С.Ю. Андреев, М.И. Яхкин, Н.Н. Ласьков, В.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований свойств динамической двухфазной дисперсионной системы «вода – воздух». Показано, что у диспергированной фазы (пузырьков воздуха), имеющих размер меньше некоторого критического значения  $d_{\min}$ , м, образуется электрический потенциал раздела фаз «вода – воздух»  $\varphi$ , В. Приведено уравнение, позволяющее определять среднюю величину электрокинетического потенциала пузырьков воздуха.

*Ключевые слова:* двухфазная система, пузырек воздуха, дисперсионный размер, электрокинетический потенциал, поверхностное натяжение, поверхностный заряд

## THEORETICAL ANALYSIS OF PROPERTIES OF A DYNAMIC TWO-PHASE WATER-AIR DISPERSION SYSTEM

S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, N.N. Laskov, V.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the properties of a dynamic two-phase water-air dispersion system are presented. It is shown that the dispersed phase (air bubbles) having a size smaller than a

certain critical value  $d_{\min}$ ,  $m$ , acquires an electric potential of the water-air phase separation  $\varphi$ ,  $V$ . The equation is given to determine the average value of the electrokinetic potential of air bubbles.

*Keywords:* two-phase system, air bubble, dispersion size, electrokinetic potential, surface tension, surface charge

Жидкости, содержащие в своем объеме пузырьки газа, являются динамическими двухфазными дисперсными системами «жидкость – газ». Технологический прием подачи воздуха в воду, позволяющий создавать динамические дисперсные системы, широко используется в процессах очистки сточных вод. Поскольку плотность газа в динамической системе «вода – воздух» на несколько порядков меньше плотности жидкости, на пузырьки действует сила Архимеда, выталкивающая их из объема жидкости, поэтому динамические системы «вода – воздух» могут существовать лишь в процессе всплывания пузырьков воздуха в толще воды. Прекращение подачи воздуха в воду, то есть отсутствие расхода легкой фазы, приводит к превращению двухфазной дисперсной системы в однофазную систему через промежуток времени, равный продолжительности всплывания пузырька воздуха в объеме воды. Интенсивное перемешивание жидкостно-газовой смеси позволяет существенно увеличить этот промежуток времени. Динамические системы «вода – воздух» могут существовать лишь в процессе движения газовой фазы относительно жидкостной фазы.

Технологические процессы, предусматривающие использование водовоздушных смесей, позволяют существенно повысить эффективность очистки сточных вод. Эффективность процессов отстаивания хозяйственно-бытовых сточных вод в первичных отстойниках станций биологической очистки может быть повышена за счет использования технологических приемов преаэрации и биокоагуляции. Пневматическое перемешивание сточных вод в усреднителях обеспечивает эффективное выравнивание концентраций содержащихся в них загрязнений и предотвращает загнивание сточных вод.

Процесс биологической очистки сточных вод в аэротенках поддерживает система аэрации, снабжающая микроорганизмы активного ила кислородом воздуха и обеспечивающая перемешивание иловой смеси в аэрационном объеме. Технологический процесс флотации позволяет удалять из сточных вод гидрофобные загрязнения. В процессах физико-химической очистки сточных вод с целью интенсификации их реагентной обработки широко используется технологический прием пневматического перемешивания реакционного объема.

Процесс свободного всплывания одиночного воздушного пузырька в объеме воды можно рассматривать как движение отдельной дисперсной частицы.

Корректное теоретическое описание процесса всплывания одиночного воздушного пузырька в объеме воды не может быть сделано без учета его основной характеристики – величины полной удельной поверхностной энергии  $E_{sy}$ , Дж/м<sup>2</sup>.

Величина полной удельной поверхностной энергии поверхности раздела фаз «жидкость – газ» может быть определена как [1]

$$E_{sy} = q_T + \sigma + G_\varphi + G_\mu = TS_T + \sigma + C_s \frac{\varphi^2}{2} + \sum_{i=1}^n \mu_i N_i, \text{ Дж/м}^2, \quad (1)$$

где  $q_T$  – скрытая теплота образования поверхности раздела фаз, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения границы раздела фаз, Дж/м<sup>2</sup>;  $G_\varphi$  – удельная поверхностная энергия электрического заряда поверхности раздела фаз, Дж/м<sup>2</sup>;  $G_\mu$  – удельная поверхностная химическая энергия веществ, адсорбирующихся на поверхности раздела фаз, Дж/м<sup>2</sup>;  $T$  – абсолютная температура поверхности раздела фаз, °К;  $S_T$  – температурный коэффициент, Дж/м<sup>2</sup>·К;  $C_s$  – удельная электрическая емкость единицы поверхности раздела фаз, Ф/ м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – электрический потенциал поверхности раздела фаз, В;  $\mu_i$  – химический потенциал  $i$ -го компонента, адсорбированного на

поверхности раздела фаз, Дж/ моль;  $N_i$  – удельное число молей  $i$ -го компонента, адсорбированного на единице площади поверхности раздела фаз, моль/м<sup>2</sup>.

На границе неискривлённой поверхности раздела фаз чистая «вода – воздух» при температуре  $T=298^\circ\text{K}$  величины поверхностного натяжения, температурного коэффициента и электрического потенциала поверхности раздела фаз имеют значения [1]:  $\sigma = 0,072 \text{ Дж/м}^2$ ;  $S_\Pi = 0,000154 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{K}$ ;  $\varphi = 0 \text{ В}$ .

Чистая вода не содержит поверхностно активных веществ, в связи с чем  $N_i = 0 \text{ моль/м}^2$ .

Величина полной удельной энергии границы раздела фаз «чистая вода – воздух» при  $T=298^\circ\text{K}$  имеет постоянное значение

$$E_{sy} = q_T + \sigma = 298 \cdot 0,000154 + 0,072 \text{ Дж/м}^2 = 0,118 = \text{const Дж/м}^2.$$

При попадании в воду поверхностно-активных веществ они адсорбируются на поверхности раздела фаз «жидкость – газ», при этом величина полной удельной поверхностной энергии не изменяет своего значения:  $E_{sy} = 0,118 = \text{const Дж/м}^2$ , а величина химической энергии веществ, адсорбированных на поверхности раздела фаз «вода – воздух», становится больше нуля  $\sum_{i=1}^n \mu_i N_i > 0$ , вследствие чего коэффициент поверхностного натяжения границы раздела фаз уменьшает свое значение  $\sigma_\mu < 0,072 \text{ Дж/м}^2$ .

В отличие от покоящейся жидкости, имеющей свободную границу раздела фаз «вода – воздух», динамическая двухфазовая система «вода – воздух» является дисперсной системой, в которой легкая фаза (воздух) распределена в объеме тяжелой фазы (вода). Вода в этой системе является сплошной средой, называемой дисперсной средой, а воздух раздроблен и распределен в объеме жидкости и называется дисперсной (диспергированной) фазой.

Пузырек воздуха, всплывающий в объеме жидкости, имеет значительно меньшие размеры, чем сам объем жидкости, и как объект с незначительными размерами он обладает важным признаком – дисперсностью. Дисперсность (раздробленность) – признак объекта, определяемый его размерами и геометрией. С ростом дисперсности повышается роль поверхностных явлений, влияющих на дисперсную фазу, так как увеличивается доля ее поверхностных молекул, увеличивается удельная поверхность, более выражено проявляются гетерогенные свойства.

Степень дисперсности пузырька воздуха может быть определена ее геометрическими характеристиками: дисперсным размером пузырька  $\delta_\Pi$  и диаметром пузырька  $d_\Pi$ .

Дисперсный размер пузырька воздуха  $\delta_\Pi$ , м, – отношение его объема  $W_\Pi$ , м<sup>3</sup>, к площади его поверхности  $S_\Pi$ , м<sup>2</sup> (величина обратная удельной площади поверхности пузырька воздуха  $A_\Pi = \frac{1}{\delta_\Pi}$ , м<sup>-1</sup>):

$$\delta_\Pi = \frac{W_\Pi}{S_\Pi}, \text{ м}. \quad (2)$$

Диаметр пузырька воздуха  $d_\Pi$ , м, – линейный размер поперечного сечения пузырька воздуха наибольшей площади  $f_\Pi$ . Поскольку поперечный размер пузырька воздуха всегда представляет собой круг, площадь его поперечного сечения может быть определена как

$$f_\Pi = \frac{\pi d_\Pi^2}{4}, \text{ м}^2. \quad (3)$$

Соотношение между величиной дисперсного размера пузырька воздуха и его диаметром определяется формой пузырька воздуха.

Для пузырька воздуха сферической формы

$$\delta_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}}{S_{\Pi}} = \frac{\pi d_{\Pi}^3}{6} \frac{1}{\pi d_{\Pi}^2} = \frac{d_{\Pi}}{6}, \text{ м.} \quad (4)$$

При некоторой критической величине дисперсного размера  $\delta_{\Pi}$  пузырька воздуха на его поверхности возникает электрический потенциал  $\varphi, \text{ В}$ , что в соответствии с формулой (1) приводит к уменьшению значения коэффициента поверхностного натяжения на его поверхности (границе раздела фаз «вода – воздух»)  $\sigma_{\mu} < 0,072 \text{ Дж/м}^2$ .

В работе [2] приводятся значения величин: диаметра  $d_{\Pi} = 0,0014 \text{ м}$  и скорости всплывания в воде  $v_{\Pi} = 0,37 \text{ м}$  для пузырька воздуха в точке перехода в режим динамического равновесия действующих на него сил: силы Архимеда  $F_{\text{Ар}}$ ; силы поверхностного натяжения (силы Лапласа)  $F_{\text{ПН}}$ ; силы гидравлического сопротивления движению пузырька  $F_{\text{ГС}}$ .

В точке перехода всплывающего пузырька в режим динамического равновесия действующих на него сил он сохраняет сферическую форму. При увеличении диаметра пузырька воздуха более  $d_{\Pi} = 0,0014 \text{ м}$  происходит его деформация, сфера сплющивается и превращается в сфероид. Изменение формы пузырька приводит к увеличению значения силы поверхностного натяжения  $F_{\text{ПН}}$  за счет увеличения радиуса кривизны его поверхности  $R, \text{ м}$ , и к увеличению значения силы гидродинамического сопротивления  $F_{\text{ГС}}$  за счет увеличения коэффициента гидродинамического сопротивления  $\xi$  (переход к сопротивлению изменившейся формы), в результате чего сохраняется режим равновесия действующих на пузырек сил.

$$F_{\text{Ар}} = F_{\text{ПН}} = F_{\text{ГС}}, \text{ Н.} \quad (5)$$

Поскольку пузырек воздуха, имеющий диаметр  $d_{\Pi} = 0,0014 \text{ м}$  и всплывающий в воде со скоростью  $v_{\Pi} = 0,37 \text{ м}$ , имеет сферическую форму, то действующие на него силы будут иметь значение

$$F_{\text{Ар}} = W_{\Pi} g (\rho - \rho_{\text{В}}) = \frac{\pi d_{\Pi}^3}{6} g (\rho - \rho_{\text{В}}), \text{ Н;} \quad (6)$$

$$F_{\text{ПН}} = f_{\Pi} \Delta P = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \frac{4\sigma_{\Pi}}{d_{\Pi}} = \pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi}, \text{ Н,} \quad (7)$$

где  $W_{\Pi}$  – объем пузырька воздуха,  $\text{м}^3$ ;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  и  $\rho_{\text{В}}$  – соответственно плотность воды и воздуха ( $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{В}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ );  $\Delta P$  – величина гидродинамического давления, действующего на всплывающий пузырек воздуха,  $\text{Па}$ .

Из формул (6) и (7) с учетом равенства (5) можно записать

$$\frac{\pi d_{\Pi}^3}{6} g (\rho - \rho_{\text{В}}) = \pi d_{\Pi} \sigma_{\Pi}, \text{ Н.} \quad (8)$$

Откуда

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^3}{6} g (\rho - \rho_{\text{В}}) = \frac{0,0014^3}{6} 9,8 (998,2 - 1,2) = 0,003 \text{ Дж/м}^2. \quad (9)$$

Из (9) следует, что коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха диаметром  $d_{\Pi} = 0,0014 \text{ м}$  имеет существенно меньшую величину  $\sigma_{\Pi} = 0,003 \text{ Дж/м}^2$ , чем коэффициент поверхностного натяжения неискривленной поверхности раздела фаз «вода – воздух»  $\sigma = 0,072 \text{ Дж/м}^2$ .

В соответствии с формулой (1) уменьшение коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_{\Pi}$  компенсируется возникновением на поверхности пузырька воздуха электрического потенциала двойного электрического слоя  $\varphi, \text{ В}$ , обуславливающего появление дополнительной удельной поверхностной энергии электрического заряда

$$C_s \frac{\varphi^2}{2} = \sigma - \sigma_{\Pi} = 0,072 - 0,003 = 0,069 \text{ Дж/м}^2. \quad (10)$$

Непосредственное измерение величины электрического потенциала двойного электрического слоя поверхности пузырька воздуха  $\varphi$  является сложной технической задачей.

В лабораторных условиях относительно просто может быть определена величина электрокинетического потенциала  $\zeta$  (дзета-потенциала) пузырька воздуха.

При относительном перемещении фаз «газ – жидкость» в процессе всплывания пузырька происходит разрыв двойного электрического слоя по плоскости скольжения, проходящей по диффузному слою, и часть противоионов остается в дисперсной среде, в результате чего дисперсная среда и дисперсная фаза приобретают разноименные заряды.

Количественная оценка средней величины дзета-потенциала динамической дисперсной двухфазовой системы «вода – воздух» может быть сделана на основе теории электроосмоса, разработанной Г. Гельмгольцем, получившей свое дальнейшее развитие в работах Ж. Перрена и М. Смолуховского [1].

В теории электроосмоса рассматривается процесс движения жидкости в капилляре под действием электрического поля (рис. 1).

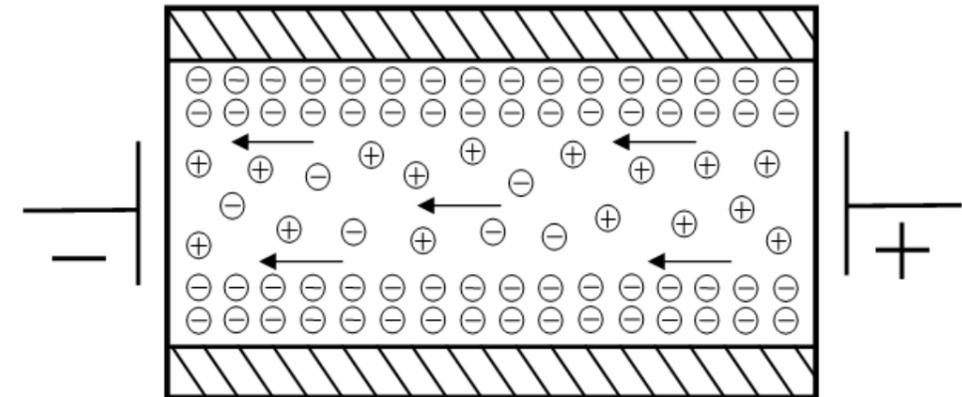


Рис. 1. Двойной электрический слой в капилляре

Под действием внешнего электрического поля положительно заряженные ионы диффузного слоя, прочно связанные с поверхностью капилляра, перемещаются в сторону отрицательно заряженного электрода и увлекают за собой жидкость (дисперсную среду). Ионы располагающиеся в пристеночной области плотного слоя прочно связаны с поверхностью капилляра и практически остаются неподвижными. Движение жидкости, обусловленное движением ионов диффузного слоя, происходит по поверхности скольжения, расположенной на расстоянии  $\delta$  от стенки капилляра.

Из условия стационарности режима электроосмотического движения жидкости в капилляре (равенстве величин электрической силы, действующей на жидкость  $F_{эл}$  и силы вязкого трения  $F_{тр}$ ) Смолуховский получил уравнение, связывающее величину скорости течения жидкости в капилляре  $U$ , м/с, и значение дзета-потенциала:

$$U = \frac{E \epsilon_0 \epsilon \zeta}{\eta}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

где  $E = \frac{dV}{dx}$  – напряжение электрического поля, В/м;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютная диэлектрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная (для воды  $\epsilon = 81$ );  $\zeta$  – величина электрокинетического потенциала, В;  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости воды, Па·с.

Величину линейной скорости движения жидкости относительно стенки капилляра (скорость электроосмоса) можно определить по формуле

$$U = \frac{Q_{ж}}{S_{к}}, \text{ м/с}, \quad (12)$$

где  $Q_{ж}$  – расход жидкости, протекающей через капилляр, м<sup>3</sup>/с;  $S_{к}$  – площадь поперечного сечения капилляра, м<sup>2</sup>.

Из (12) имеем

$$S_{к} = \frac{Q_{ж}}{U}, \text{ м}^2. \quad (13)$$

С учетом закона Ома

$$V = IR = \frac{I l_{э}}{S_{R} \chi}, \quad (14)$$

где  $V$  – внешняя разность потенциалов, В;  $I$  – сила тока, А;  $R$  – электрическое сопротивление, Ом;  $\chi$  – удельная электропроводность среды (жидкости), См/м;  $l_{э}$  – расстояние между электродами, м.

Величина напряженности электрического поля может быть определена как

$$E = \frac{V}{l_{э}} = \frac{IR}{l_{э}} = \frac{I l_{э}}{S_{к} \chi l_{э}} = \frac{I}{S_{к} \chi}, \text{ В/м}. \quad (15)$$

Подставляя в формулу (15) формулу (13), получим

$$E = \frac{UI}{Q_{ж} \chi}, \text{ В/м}. \quad (16)$$

Из формулы (11) имеет место равенство

$$E = \frac{U \eta}{\epsilon \epsilon_0 \zeta}, \text{ В/м}, \quad (17)$$

откуда

$$\frac{UI}{Q_{ж} \chi} = \frac{U \eta}{\epsilon \epsilon_0 \zeta}, \text{ В/м}, \quad (18)$$

и

$$Q_{ж} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta I}{\chi \eta}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (19)$$

Из равенства

$$Q \Delta P = IV, \text{ Вт}, \quad (20)$$

где  $\Delta P$  – величина перепада давления в капилляре, Па, с учетом (19) получим

$$IV = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta I}{\chi \eta}, \text{ Вт}, \quad (21)$$

откуда

$$V = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta \Delta P}{\chi \eta}, \text{ В}. \quad (22)$$

Уравнение (23) является уравнением Гельмгольца – Смолуховского для расчета величины потенциала течения  $V$ , В, через значение величины электрокинетического потенциала  $\zeta$ , В.

Уравнение Гельмгольца – Смолуховского также может быть использовано для определения среднего значения величины электрокинетического потенциала  $\zeta$ , В, поверхности всплывающих пузырьков воздуха через значение величины потенциала течения  $V$ , В, возникающего в слое динамической дисперсной смеси «вода – воздух» толщиной  $l_{э}$ , м, расположенном между двумя измерительными электродами (рис. 2).

$$\zeta = \frac{V \chi \eta}{\epsilon \epsilon_0 \Delta P}, \text{ В}. \quad (23)$$

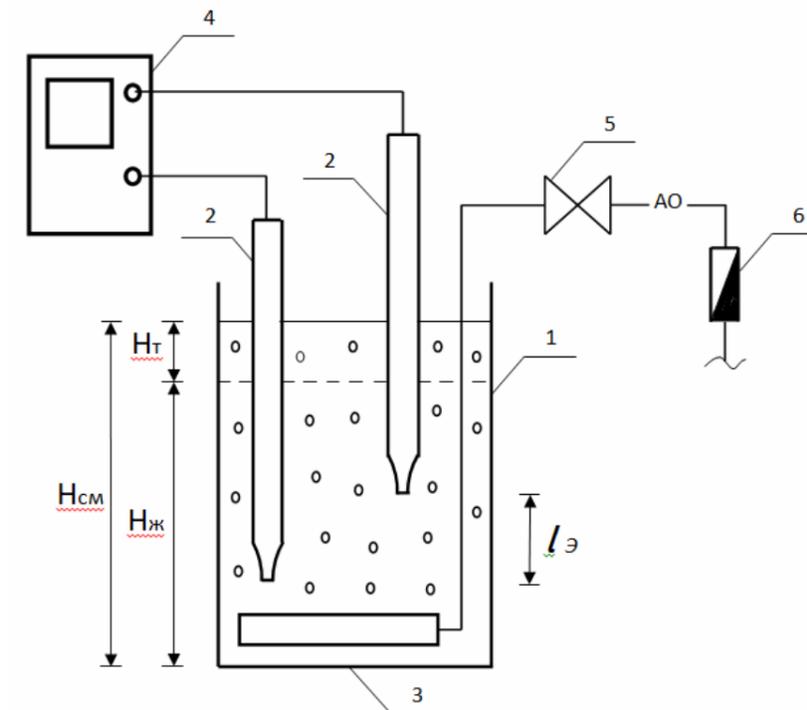


Рис. 2. Схема лабораторной установки для определения среднего значения электрокинетического потенциала течения пузырьков воздуха  $\zeta$ , В:  
1 – стеклянный стакан; 2 – измерительные электроды; 3 – устройство диспергирования газовой фазы; 4 – устройство для измерения потенциала течения газовой фазы; 5 – вентиль, регулирующий расход сжатого воздуха; 6 – ротаметр

Величина перепада давления  $\Delta P$ , Па, в слое динамической дисперсной смеси толщиной  $l_3$ , м, может быть определена как

$$\Delta P = \frac{F_{AP}}{S}, \text{ Па}, \quad (24)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения стакана,  $\text{м}^2$ ;  $F_{AP}$  – величина силы Архимеда, действующей на газовую фазу, Н.

$$F_{AP} = W_r (\rho - \rho_b) g, \text{ Н}, \quad (25)$$

где  $W_r$  – объем газовой фазы пузырьков воздуха в слое динамической дисперсной смеси,  $\text{м}^3$ .

Величина поперечного сечения стакана может быть определена как отношение объема жидкости в стакане  $W_{ж}$ ,  $\text{м}^3$ , к высоте этого объема  $l_3$ , м:

$$S = \frac{W_{ж}}{l_3}, \text{ м}^2. \quad (26)$$

Подставляя формулы (24), (25), (26) в формулу (23), получим

$$\zeta = \frac{V\chi\eta S}{\epsilon\epsilon_0 F_{AP}} = \frac{V\chi\eta}{\epsilon\epsilon_0 (\rho - \rho_b) g l_3} \frac{W_{ж}}{W_r}. \quad (27)$$

Безмерная величина, выражающая отношение объема, занимаемого газовой фазой  $W_r$  в динамической двухфазной смеси, к объему жидкой фазы  $W_{ж}$ , называется относительным объемом двухфазной смеси «вода – воздух»:

$$\bar{W} = \frac{W_r}{W_{ж}}. \quad (28)$$

При отсутствии подачи воздуха в устройство диспергирования газовой фазы 3 в стакане 1 будет находиться однофазная среда (жидкость). Высота слоя жидкости в этом случае будет иметь значение  $H_{ж}$ , м. Жидкость в стакане будет занимать объем

$$W_{ж} = S \cdot H_{ж}, \text{ м}^3. \quad (29)$$

При подаче сжатого воздуха с расходом  $Q_r$  в устройство 3 в стакане 1 образуется динамическая дисперсная смесь. Высота слоя динамической двухфазной смеси увеличится на величину  $H_r$ , м. Общий объем диспергированной фазы (воздуха) в смеси «вода – воздух» будет иметь величину

$$W_r = S (H_{CM} - H_{ж}), \text{ м}^3. \quad (30)$$

С учетом формул (28), (29) и (30) формула (27) запишется в виде

$$\zeta = \frac{V\chi\eta}{\epsilon\epsilon_0 (\rho - \rho_b) g l_3 \bar{W}} = \frac{V\chi\eta}{\epsilon\epsilon_0 (\rho - \rho_b) g l_3} \frac{H_{ж}}{H_{CM} - H_{ж}}, \text{ В}. \quad (31)$$

Проведенный теоретический анализ свойств динамической двухфазной дисперсной системы «вода – воздух» показал, что у пузырьков воздуха, имеющих дисперсный размер меньше некоторой критической величины  $d_{min}$ , образуется электрический потенциал поверхности раздела фаз «вода – воздух»  $\phi$ , В, что обуславливает появление на их поверхности дополнительной удельной энергии электрического заряда

$G_\phi$ , Дж/ $\text{м}^2$ , и приводит к уменьшению величины коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_n$ , Дж/ $\text{м}^2$ .

Полученное уравнение (31) позволяет по экспериментальным значениям характеристик динамической двухфазной смеси вычислить среднюю величину электрокинетического потенциала  $\zeta$  ее диспергированной фазы (пузырьков воздуха), являющегося количественным показателем, отражающим свойства двойного электрического слоя.

#### Список литературы

1. Волков, В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы / В.А. Волков. – СПб.: Издательство «Лань», 2015 – 672 с.
2. Andreev, S.Y. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Y. Andreev, I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 687. – 066054. – Doi: 10.1088/1757-899x/687/6/066054.

#### References

1. Volkov, V.A. Colloidal chemistry. Surface phenomena and dispersed systems / V.A. Volkov. – St. Petersburg: Publishing House Lan, 2015 – 672 p.
3. Andreev, S.Y. Evaluating the patterns of air bubble rise in water-air mixtures used in natural and waste water treatment processes / S.Y. Andreev, I.A. Garkina, M.I. Yakhkind // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 687. – 066054. – Doi: 10.1088/1757-899x/687/6/066054.

УДК 698

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

**Ерёмкин Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Аверкин Александр Григорьевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: tgv@pguas.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна,**  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Информационное  
обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

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

**Eremkin Aleksander Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Averkin Aleksander Grigorevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the «Heat,  
Gas Supply and Ventilation»  
E-mail: tgv@pguas.ru

Penza State university  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Ponomareva Inna Konstantinovna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Information support  
management and production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ АКТУАЛЬНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕДНОСТЕЙ ОТ СГОРАНИЯ СВЕЧЕЙ И ВОЗДУХООБМЕНА ДЛЯ ИХ АССИМИЛЯЦИИ В ПРАВОСЛАВНЫХ КУЛЬТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ

А.И. Ерёмкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева

Авторами установлено, что в залах богослужения расчет воздухообмена для климатического обеспечения комфортных условий и сохранности убранства производится только с учетом ассимиляции выделяющихся вредностей от сгорания свечей (теплоты, углекислого газа, водяного пара) и от прихожан (теплоты, влаги, углекислого газа), а также теплопоступлений от солнечной радиации и оборудования.

*Ключевые слова:* зал богослужения, свеча, пламя, продукты сгорания, копоть, сажа, воздухообмен

## ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON JUSTIFICATION OF THE RELEVANCE OF DETERMINATION OF HARMFULS FROM THE COMBUSTION OF CANDLES AND AIR EXCHANGE FOR THEIR ASSIMILATION IN ORTHODOX RELIGIOUS BUILDINGS

A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva

The authors have found that in the halls of worship, the calculation of air exchanges for the climatic provision of comfortable conditions and the safety of the decoration is carried out only taking

into account the assimilation of harmful emissions from the combustion of candles (heat, carbon dioxide, water vapor) and from parishioners (heat, moisture, carbon dioxide) as well as heat gained from solar radiation and equipment.

*Keywords:* worship hall, candle, flame, combustion products, soot, air exchange

Известно, что горящие свечи и лампадное масло являются обязательной атрибутикой обряда православного богослужения. Сажа и копоть при сгорании свечей и лампадного масла конвективными потоками разносятся внутри зала богослужения и в результате сорбции оседают на стенах, внутренних поверхностях убранства и интерьера, нанося им существенный ущерб [1, 2, 3, 6].

В связи с этой защитой архитектурных элементов, настенных росписей, икон, золочения, иконостаса, церковной утвари от копоти и сажи приобретает особую важность и актуальность.

В 2000 году в государственном научно-исследовательском институте реставрации была выполнена работа «Микроклимат церковных зданий (основы нормализации температурно-влажностного режима памятников культовой архитектуры)», которая была посвящена определению качественного и количественного состава веществ, образующихся при сгорании свечей и лампадного масла. В результате было установлено, что в объеме зала богослужения поступают продукты сгорания в виде твердой фазы: сажи, копоти и смолянистых веществ, а также газообразные составляющие – углекислый газ, водяной пар, водород, кислород. Согласно полученным данным в состав сажи входит технический углерод (до 80–95 %) и углеводородистые фракции. Практика показала, что на процесс загрязнения существенно влияет температура и влажность на внутренних поверхностях стен и убранства культовых сооружений [8].

Известно, что в процессе обряда богослужения в залах культовых сооружений горящие свечи могут быть установлены в нескольких десятках подсвечников, также находятся у сотен прихожан, а в течение года сжигается сотни килограммов церковных парафиновых и восковых свечей.

В результате сорбции продуктов сгорания свечей и лампадного масла при длительном воздействии образуется толстый слой маслянистых загрязнений на историко-культурных ценностях внутри церквей, храмов и соборов.

Свеча – это изделие, приспособление для освещения (изначально) или для некоторых других целей, в том числе импользуемое в качестве атрибутики обряда ритуального богослужения, чаще всего в виде цилиндра из твердого горючего материала с фитилем, проходящим вдоль цилиндра по его центру. Горючим материалом может служить: сало, стеарин, воск, парафин, спермацет или другое вещество с подходящими свойствами (легкоплавкость, горючесть, твердость). В настоящее время чаще всего используется смесь парафина со стеарином и различными добавками (красители и тому подобное). Фитиль пропитывают растворами селитры, хлористого аммония, борной кислоты, для того чтобы он лучше сгорал по мере уменьшения свечи и не создавал слишком большого пламени [4].

Горение восковой свечи описывает уравнение [4]



Химический состав продуктов горения парафиновой свечи представлен в виде уравнения [4]



Сажа – это аморфный углерод, продукт неполного сгорания горючего материала свечи. Сажа входит в категорию частиц, опасных не только для убранства залов, но и для легких человека, так как частицы сажи менее 5 мк в диаметре не отфильтровываются в верхних дыхательных путях [7].

Химический состав сажи представлен в следующей формулой [4, 7, 10]:



Кроме углерода, в состав сажи входят водород, кислород, водяной пар. Водород и кислород присутствуют в саже вследствие абсорбции их частицами сажи из продуктов горения [4, 10, 12].

На основе анализа отечественных и зарубежных исследований установлено, что в залах богослужения расчет воздухообмена для климатического обеспечения комфортных условий и сохранности убранства производится только с учетом ассимиляции выделяющихся вредностей от сгорания свечей (теплоты, углекислого газа, водяного пара) и от прихожан (теплоты, влаги, углекислого газа), а также теплопоступлений от солнечной радиации и оборудования [1–4, 9, 11].

Однако при расчете воздухообмена в зале богослужения не учитывается концентрация в воздухе твердой фазы копоти и сажи, образующихся при сгорании свечей, из-за отсутствия опытных данных для выполнения расчетов.

При существующем воздухообмене копоть и сажа остаются внутри помещения, что приводит к негативным последствиям для состояния церковного убранства и здоровья прихожан.

Для устранения выявленных проблем и обеспечения специалистов в области систем климатизации справочной информацией авторами разработана методика измерения массовой концентрации копоти и сажи, образующихся при сжигании свечей, а также представлен алгоритм расчета воздухообмена в зале богослужения.

Как описывалось выше, в настоящее время имеются исследования и данные только по определению вредностей в виде теплоты, влаги и углекислого газа, а также методы расчета воздухообмена для их ассимиляции [1].

Приведем некоторые сведения, необходимые для определения концентрации копоти и сажи в воздухе зала богослужения. Известно, что при производстве свечей их количество, производимое из 1 кг воска или парафина, зависит от массы и размера (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Параметры свечей, производимых из 1 кг парафина (воска)

№ свечи	Количество свечей в пачке, шт	Вес одной свечи, г	Высота одной свечи, см	Время горения одной свечи, мин
20	50	20	30	180
40	100	10	26	90
80	200	5	18	55
120	300	3,3	15,5	45
140	350	2,86	15	40

Имеются данные о том, что низкая теплота сгорания парафина (данные по воску отсутствуют) составляет 46,81 МДж/кг. Масса и размеры свечей, выпускаемых из 1 кг парафина (воска), влияют на величину тепловыделения и времени сгорания (табл. 2). Кроме того, при сгорании данной массы свечей выделяется 1,3 кг/кг влаги и 1650 л/кг углекислого газа [1].

Т а б л и ц а 2

Показатели процесса горения церковных свечей

№ свечи	Тепловыделения при горении, Вт		Влаговыведения, кг/ч		Поступление CO <sub>2</sub> , л/ч	
	1 кг	одной свечи	1 кг	одной свечи	1 кг	одной свечи
20	4334	86,7	0,433	0,0087	550	11
40	8669	86,7	0,867	0,0087	1100	11
80	14185	70,9	1,418	0,0071	1799	9,0
120	17337	57,8	1,733	0,0058	2200	7,3
140	19504	55,7	1,949	0,0057	2474	7,1

Рассмотрим прогноз количества горящих свечей в зависимости от числа прихожан, присутствующих при богослужении (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Тепло- и влаговыведения при различном заполнении зала богослужения

Заполнение храма, %	Количество человек, шт.	Количество свечей, шт.	Тепло-выделения, кг/ч	Влаго-выделения, кг/ч	Требуемый расход воздуха, кг/ч
5	4	16	1418	0,3048	1042
25	20	80	7137	1,5284	4144
50	39	156	13908	2,9795	6859
75	56	224	19993	4,2804	8568
100	78	312	27848	5,9621	10335
125	98	392	34985	7,4904	11450
150	117	468	41740	8,9399	12317

Количество свечей, приведенных в табл. 3, принято из расчета 4 свечи на одного человека с номерами: №20 – 5 %, №40 – 15 %, №80 – 20 %, №120 – 25 %, №140 – 35 % [1].

Авторами предлагается определять тепловыделения  $Q_{tv}$ , Вт, влаговыведения  $G_{vv}$ , г/ч, и газовыделения  $G_{gv}$ , л/ч, при сгорании свечей по формулам [1]:

$$Q_{tv} = \sum_{i=1}^n (n_i g_{tv}); \quad (4)$$

$$G_{vv} = \sum_{i=1}^n (0,001 n_i g_{vv}); \quad (5)$$

$$G_{gv} = \sum_{i=1}^n (0,001 n_i g_{gv}), \quad (6)$$

где  $Q_{tv}$ ,  $G_{vv}$ ,  $G_{gv}$  – соответственно тепло-, влаго- и газовыделения от горящих свечей, Вт, г/ч, л/ч;  $g_{tv}$ ,  $g_{vv}$ ,  $g_{gv}$  – соответственно тепло-, влаго- и газовыделения от одной горящей свечи, Вт, г/ч, л/ч;  $n_i$  – количество свечей данного номера, шт.

Известно, что тепловыделения  $g_{tv}$ , Вт, влаговыведения  $g_{vv}$ , г/ч, газовыделения  $g_{gv}$ , л/ч, образующиеся при сгорании одной свечи, допускается рассчитывать по эмпирическим зависимостям [1]:

$$g_{tv} = 23,074 + 13,681m - 0,938m^2 + 0,0207m^3; \quad (7)$$

$$g_{vv} = 2,7126 + 1,218m - 0,0778m^2 + 0,0016m^3; \quad (8)$$

$$g_{gv} = 2,9776 + 1,7145m - 0,1167m^2 + 0,0026m^3, \quad (9)$$

где  $m$  – масса одной свечи, г.

Приведенные данные позволяют определить воздухообмен для ассимиляции тепло- и влаговыведения, а также углекислого газа в залах богослужения [2, 3, 8].

Расход приточного воздуха  $L_{tv}$ , м<sup>3</sup>/ч, необходимого для ассимиляции тепловыделений при сгорании свечей и от прихожан, определяется по формуле [2, 3, 5]

$$L_{tv} = \frac{3,6 \cdot Q_{tv}}{(I_{yx} - I_{pr})\rho v}, \quad (10)$$

где  $I_{yx}$ ,  $I_{pr}$  – соответственно энтальпия удаляемого и приточного воздуха, кДж/кг (определяется по  $I-d$ -диаграмме).

Расход приточного воздуха для ассимиляции влаговывделений  $L_{vv}$ , м<sup>3</sup>/ч, определяется по формуле [2, 3, 8]

$$L_{vv} = \frac{G_{vv}}{(d_{yx} - d_{pr})\rho_v}, \quad (11)$$

где  $d_{yx}$ ,  $d_{pr}$  – соответственно влагосодержание удаляемого и приточного воздуха, ч/кг (определяется по  $I-d$ -диаграмме).

Расход приточного воздуха, необходимого для ассимиляции углекислого газа,  $L_{gv}$ , м<sup>3</sup>/ч, определяется по формуле [2, 3, 5]

$$L_{gv} = \frac{G_{gv}}{(C_2 - C_1)}, \quad (12)$$

где  $C_2$ ,  $C_1$  – соответственно газосодержание (CO<sub>2</sub>) удаляемого и приточного воздуха (приводится в справочных материалах или определяется для конкретного объекта), л/ч.

Анализ результатов приведенных выше исследований, а также справочной и нормативной литературы позволяет сделать вывод, что имеются сведения только для расчета тепло, влаго- и газовыделения от людей, при сжигании церковных свечей и воздухообменов для их ассимиляции.

Вместе с тем установлено, что в настоящее время отсутствуют исследования по определению количества выделяющихся копоти и сажи при сжигании парафиновых и восковых свечей, а также отсутствует методика расчета воздухообмена для их ассимиляции. Хотя известно, что копоть и сажа являются основным источником вредных выделений, отрицательно влияющих на комфортные условия и убранство зала богослужения православных соборов, храмов и церквей.

Следовательно, проведение исследований по разработке способа определения количества выделяющихся копоти и сажи при сжигании свечей и методики расчета воздухообмена для их ассимиляции в зале богослужения является актуальной задачей.

#### Список литературы

1. Щукина, Т.В. Влияние на микроклимат количества людей с разной заполняемостью храмов / Т.В. Щукина, Н.А. Драпалюк, М.Н. Шерлыккина, М.А. Бойченко // СОК. – 2019. – № 11. – С. 66–69.
2. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов: монография / А.Г. Кочев. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. – 449 с.
3. АВ ОК Стандарт – 2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: отраслевой стандарт. – М.: АВ ОК-ПРЕСС, 2004. – 14 с.
4. Зяблов, А.Н. Аналитическая химия / А.Н. Зяблов. – Воронеж: ВГУ, 2006. – 75 с.
5. Кочев, А.Г. Системы кондиционирования микроклимата в православных храмах / А.Г. Кочев. – М.: Авок-Пресс, 2009. – 230с.
6. Чем дышат храмы? Благовест. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>. – (11.11.2021).
7. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
8. Микроклимат церковных зданий (основы нормализации ТВР памятников культовой архитектуры). – М.: ГосНИИР, 2000. – 125 с.
9. Беляевская, О. Как защитить храм от сажи и копоти / О. Беляевская, И. Фомин // Храмоиздатель. – 2013. – № 2. – С. 20–25.
10. Мачулин, Л. Золушка углеродного мира / Л. Мачулин // Наука и жизнь. – 2021. – № 1. – С. 40–47.

11. Еремкин, А.И. Пути повышения качества микроклимата в зале богослужения Спасского кафедрального собора г. Пензы / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, К.А. Петрова, А.Г. Багдасарян // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 125–136.

12. Еремкин, А.И. Методика расчета воздухообмена системы кондиционирования воздуха вытесняющего типа в залах богослужения православных соборов / А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 3. – С. 161–168.

#### References

1. Shchukina, T.V. Influence on the microclimate of a number of people with different occupancy rates of churches / T.V. Shchukina, N.A. Drapalyuk, M.N. Sherlykina, M.A. Boychenko // SOK. – 2019. – No. 11. – P. 66–69.
2. Kochev, A.G. Microclimate of Orthodox churches: monograph / A.G. Kochev. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2004. – 449 p.
3. AVOK Standard – 2-2004. Orthodox churches. Heating, ventilation and air conditioning: industry standard. – M.: AVOK-PRESS, 2004. – 14 p.
4. Zyablov, A.N. Analytical chemistry / A.N. Zyablov. – Voronezh: Voronezh State University, 2006. – 75 p.
5. Kochev, A.G. Microclimate conditioning systems in Orthodox churches / A.G. Kochev. – M.: Avok-Press, 2009. – 230p.
6. How can temples breathe? Blagovest. – URL: <http://blagovest.ru/blog/chem-dyshatphramy>, free – (11.11.2021).
7. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 28, 2021 On the approval of sanitary rules and norms SanPIN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans.»
8. Microclimate of church buildings (the basis for the normalization of TVR of monuments of religious architecture). – M.: GosNIIR, 2000. – 125 p.
9. Belyaevskaya, O. How to protect the temple from soot / O. Belyaevskaya, I. Fomin // Hramoizdatel. – 2013. – No. 2. – P. 20–25.
10. Machulin, L. Cinderella of the Carbon World / L. Machulin // Science and Life. – 2021. – No. 1. – P. 40–47.
11. Eremkin, A.I. Ways to improve the quality of the microclimate in the worship hall of the Spassky Cathedral in Penza / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, K.A. Petrova, A.G. Bagdasaryan // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 4. – P. 125–136.
12. Eremkin, A.I. Methodology for calculating the air exchange of the displacing type air conditioning system in the worship halls of Orthodox cathedrals / A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 3. – P. 161–168.

УДК 544.773.2:546.11

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

**Вилкова Наталья Георгиевна,**  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

**Шумкина Анна Александровна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Физика и химия»  
E-mail: shumkina.anna.78@mail.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40,  
тел.: (8412) 36-82-09; факс: (8421) 36-84-00

**Мишина Светлана Ивановна,**  
кандидат химических наук,  
доцент кафедры «Химия и теория  
и методика обучения химии»  
E-mail: elancv@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

**Vilkova Natalya Georgievna,**  
Doctor of Chemical Sciences, Professor  
of the department « Physics and Chemistry»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

**Shumkina Anna Aleksandrovna**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Physics and Chemistry»  
E-mail: shumkina.anna.78@mail.ru

Penza State University  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnay St.,  
tel.: (8412) 36-82-09; fax: (8421) 36-84-00

**Mishina Svetlana Ivanovna,**  
Candidate of Chemical Sciences, Associate  
Professor of the department «Chemistry and  
Theory and Methodology of Teaching  
Chemistry»  
E-mail: elancv@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕХФАЗНЫХ ПЕН

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, А.А. Шумкина

Пены, содержащие твердые частицы, интенсивно исследуются в последние годы, что обусловлено их широким применением в промышленном производстве. Известно, что одной из причин устойчивости таких дисперсных систем является снижение межфазной поверхностной энергии в результате выхода гидрофобизованных частиц на границу раздела фаз. В зависимости от степени их гидрофобности возможны различные варианты расположения частиц на межфазной поверхности жидкость – газ, что определяет в дальнейшем устойчивость образующейся пены. Каптей теоретически показал, что угол контакта ( $\theta$ ) поверхности наночастиц для стабилизации пленки пены может быть между  $20^\circ$  и  $90^\circ$ , однако в работах Хантера высказано предположение, что оптимальный угол контакта может составлять от  $70^\circ$  до  $80^\circ$ . Принято считать также, что очень хорошие пены возможны, когда угол контакта достигает  $80^\circ$  и более. Однако оптимальные условия для стабилизации твердых частиц и формирования устойчивой пены еще не ясны. В связи с этим разработана оптимального режима гидрофобизации твердой поверхности, которая может быть достигнута в результате поверхностной модификации частиц при химическом взаимодействии с гидрофобизатором (направленный синтез), а также их диспергирования в водной фазе при изменении pH среды, концентрации электролита или ультразвуковом воздействии на исходную суспензию, является актуальной.

Проведен анализ влияния водородного показателя на изменение краевого угла смачивания твердых частиц и устойчивость трехфазных пен.

Показано, что гидрофобизация оксида кремния гексиламином происходит при pH более 7 и соответствует взаимодействию гидрофобизатора с отрицательно заряженной поверхностью твердой фазы. В указанной области водородного показателя повышение относительной степени гидрофобизации твердой поверхности ( $N_g$ ) сопровождалось ростом краевого угла смачивания оксида кремния, увеличением среднего радиуса частиц-стабилизаторов и повышением устойчивости дисперсной системы. Однако повышение краевого угла смачивания частиц более  $45^\circ$  не приводило к образованию устойчивых пен. Пены, стабилизированные гидрофобизованными гидроксидом алюминия и оксидом титана, могут быть получены только при pH=4,8-5 и pH=5, которые

близки по значению к изоэлектрическим точкам указанного гидроксида и оксида. Вероятно, только частицы с низким зарядом и оптимальным краевым углом смачивания являются энергетически выгодными для их расположения на границе вода – газ и могут обеспечить устойчивость такой дисперсной системы.

*Ключевые слова:* пена, гидрофобизованные частицы, водородный показатель, краевой угол, устойчивость

## EFFECT OF PH ON THE STABILITY OF THREE-PHASE FOAMS

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, A.A. Shumkina

Foams containing solid particles have been intensively investigated in recent years, due to the wide possibilities of their technological applications. It is known that one of the reasons for the stability of such dispersed systems is a decrease in the interfacial surface energy as a result of the release of hydrophobized particles to the interface. Depending on the degree of their hydrophobicity, various variants of the arrangement of particles on the liquid-gas interface are possible, which further determines the stability of the resulting foam. Kaptei theoretically showed that the contact angle ( $\theta$ ) of the nanoparticle surface to stabilize the foam film can be between  $20^\circ$  and  $90^\circ$ , however, in the works of Hunter, it was suggested that the optimal contact angle could be from  $70^\circ$  to  $80^\circ$ . It is also generally accepted that very good foams are possible when the contact angle reaches  $80^\circ$  or more. However, the optimal conditions for stabilizing particulate matter and forming a stable foam are not yet clear. In this regard, the development of an optimal mode of hydrophobization of a solid surface, which can be achieved as a result of surface modification of particles during chemical interaction with a hydrophobizer (directed synthesis), as well as their dispersion in the aqueous phase when the pH of the medium, electrolyte concentration or ultrasonic action on the initial suspension changes, is relevant.

The analysis of the influence of the hydrogen index on the change in the contact angle of wetting of solid particles and the stability of three-phase foams is given.

It is shown that the hydrophobization of silicon oxide with hexylamine occurs at pH more than 7 and corresponds to the interaction of the hydrophobizer with the negatively charged surface of the solid phase. In the indicated region of the pH, an increase in the relative degree of hydrophobization of the solid surface ( $N_g$ ) was accompanied by an increase in the contact angle of silicon oxide wetting, an increase in the average radius of stabilizer particles, and an increase in the stability of the dispersed system. However, an increase in the particle wetting angle of more than  $45^\circ$  did not lead to the formation of stable foams. Foams stabilized by hydrophobized aluminum hydroxide and titanium oxide can be obtained only at pH = 4.8-5 and pH = 5, which are close in value to the isoelectric points of the indicated hydroxide and oxide. Probably, only particles with a low charge and an optimal contact angle are energetically favorable for their location at the water-gas interface and can ensure the stability of such a dispersed system.

*Keywords:* foam, hydrophobized particles, pH value, contact angle, stability

Эмульсии и пены, содержащие твердые частицы, интенсивно исследуются в последние годы, что обусловлено их широким применением в промышленном производстве [1–16]. Известно, что одной из причин устойчивости дисперсных систем, содержащих твердую фазу, является снижение межфазной (жидкость – газ) поверхностной энергии в результате выхода гидрофобизованных частиц на границу раздела [3–5, 9]. При этом энергия адгезии наночастиц на границе раздела воздух – жидкость в несколько сотен или тысяч раз больше, чем у типичной молекулы поверхностно-активного вещества. Как только наночастицы прикрепляются к границе раздела воздух – жидкость, такое прикрепление обычно необратимо [13]. Расположение твердой частицы на границе раздела жидкость – газ зависит от степени заполнения её поверхности гидрофобизаторами и определяется межфазными поверхностными натяжениями: между жидкостью и газом; твердой частицей и жидкостью; твердой частицей и газом. В зависимости от степени ее гидрофобности возможны различные варианты расположения частицы на межфазной поверхности жидкость – газ, что определяет в дальнейшем устойчивость образующейся пены. Однако оптимальные условия для стабилизации частиц все еще не ясны.

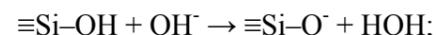
Каптэй [14] теоретически показал, что угол контакта ( $\theta$ ) поверхности наночастиц для стабилизации пленки пены может быть между  $20^\circ$  и  $90^\circ$ , однако Хантер и др. [15] предположили, что оптимальный угол контакта может составлять от  $70^\circ$  до  $80^\circ$ . Принято считать, что очень хорошие пены возможны, когда угол контакта достигает  $80^\circ$  и более. Комбинация частиц с низким зарядом и относительно высокой гидрофобностью, по-видимому, является существенным требованием для энергетически выгодного расположения их на поверхности воздух – вода по сравнению с объемом. В настоящее время основными направлениями в повышении стабилизирующего действия твердых частиц являются:

- синтез разнообразных нано- и микрочастиц, которые могут быть полезны для модификации промышленных, лекарственных, косметических, пищевых пен эмульсий;
- использование белков для разработки технологий повышения устойчивости дисперсных систем, содержащих твердую фазу;
- разработка оптимального режима гидрофобизации твердой поверхности, которая может быть достигнута в результате поверхностной модификации частиц при химическом взаимодействии с гидрофобизатором (направленный синтез), а также их диспергирования в водной фазе при изменении pH среды, концентрации электролита или ультразвуковом воздействии на исходную суспензию.

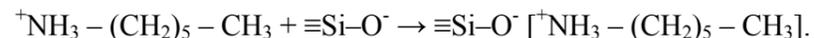
В связи с этим анализ влияния водородного показателя на изменение краевого угла смачивания твердых частиц и устойчивость трехфазных пен является актуальным.

Исследованные нами ранее гетерогенные процессы взаимодействия ПАВ и твердых частиц различной природы могут быть описаны определенными химическими реакциями. В частности, взаимодействие поверхности частицы кремнезема и ПАВ с короткой длиной углеводородной цепи, например гексилamina, идет до тех пор, пока на поверхности кремнезема не образуется монослой ПАВ, и соответствует двум стадиям:

- а) образование отрицательно заряженной поверхности кремнезема:



- б) взаимодействие гексилamina с твердой поверхностью



Пены, стабилизированные частицами оксида алюминия, гидрофобизованными масляной и валериановой кислотами ( $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$ ,  $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$ ), рассматривались в работах [7–9]. Большое влияние на процесс коагуляции и свойства образующейся пены оказывает водородный показатель. Известно, что растворы солей алюминия (сульфат алюминия, хлорид алюминия) образуют золи различного заряда при изменении pH. При этом исходные растворы этих солей имеют кислую реакцию среды. Раствор  $\text{AlCl}_3$  при добавлении щелочи ( $\text{pH} > 5$ ) образует золь гидроксида алюминия. Точка нулевого заряда частиц  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , приготовленных выщелачиванием водорастворимых солей алюминия, соответствует  $\text{pH}=6,7$ . При изменении pH среды формируются золи различного знака. В частности, при pH менее 4 продуктами гидролиза сульфата алюминия являются положительно заряженные сильногидратированные частицы состава:  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  или  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2]^+$ ; при pH 5,5 идет образование нейтральных комплексов  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3]$ . Отрицательно заряженные продукты гидролиза образуются при pH более 7.

При взаимодействии частиц такого золь с раствором масляной кислоты на поверхности раздела частица/вода молекулы кислоты химически адсорбируются на поверхности микрохлопьев  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , образуя соли алюминия  $((\text{C}_3\text{H}_7\text{COO})_3\text{Al})$ , способные стабилизировать пену. Чем больше концентрация кислоты при определенной концентрации золь, тем в большей степени гидрофобизируются частицы  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

Свойства трехфазных пен, содержащих оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), подробно изучались нами ранее [5–7, 11, 16]. Необходимо подчеркнуть, что для исследованных форм

оксида кремния изоэлектрическая точка и точка нулевого заряда соответствуют значению водородного показателя  $\text{pH}=1,8-2,2$ . Отметим, что при  $\text{pH} < 2$  частицы  $\text{SiO}_2$  заряжены положительно, а при  $\text{pH} > 2$  – отрицательно. При добавлении гексилamina к суспензиям кремнезема (даже в самых малых количествах – 10 ммоль/л) значения водородного показателя соответствовали щелочной области. В частности, в суспензиях людокс с массовым содержанием кремнезема 3 % и при концентрациях гидрофобизатора 10; 20; 40 ммоль/л значения водородного показателя были равны 8, 10, 11 соответственно. То есть во всех проведенных опытах взаимодействие гидрофобизатора – гексилamina – происходило с отрицательно заряженной поверхностью кремнезема и значениях pH более 7. В указанной области водородного показателя повышение относительной степени гидрофобизации твердой поверхности ( $N_g$ ) сопровождалось ростом краевого угла смачивания оксида кремния, увеличением среднего радиуса частиц-стабилизаторов (табл. 1) и повышением устойчивости образующейся пены в определенных пределах.

Т а б л и ц а 1

Зависимость средних радиусов частиц оксида кремния и краевых углов смачивания  $\theta$  от концентрации гидрофобизатора ( $C_g$ ), электролита и степени относительной гидрофобизации твердой поверхности ( $N_g$ )

Состав суспензии	$C_{\text{NaCl}}$ , ммоль/л	$R$ , мкм	$\theta_{W_2}$ , °	$C_g$ , ммоль/л	$N_g$
2 % LudoxHS-40	-	12	42	40	2
2 % LudoxHS-40	0,1	12	46	40	2
2 % LudoxHS-40	0,01	5	30	10	0,5
2 % LudoxHS-40	0,1	9	39	10	0,5
2 % Аэросил-380	0,4	15	49	10	0,5

\*Значения средних радиусов указаны для фракций с содержанием частиц более 50 %.

Как видим из табл. 1, увеличение степени гидрофобизации людокс от 0,5 до 2 при одинаковой концентрации электролита повышает значения краевого угла смачивания от  $39^\circ$  до  $46^\circ$ . Рост относительной степени гидрофобизации твердой поверхности может сопровождаться повышением устойчивости дисперсной системы. В частности, пены с содержанием Аэросила 2 % и  $N_g = 0,9-2,75$  очень устойчивы, их время жизни составляет несколько месяцев при условии отсутствия каких-либо внешних воздействий. Для пен, полученных из более концентрированных суспензий, например 4 %  $\text{SiO}_2$ , при увеличении степени гидрофобизации поверхности до  $N_g = 1,63$  наблюдается переход пены в гель, который в гравитационном поле живет сколь угодно долго. Но при дальнейшем увеличении количества гидрофобизатора (для 4 %  $> 120$  мм,  $N_g$  более 3) вязкость системы начинает снижаться, и в результате образуется подвижная суспензия, при встряхивании которой получается объемная, но быстро разрушающаяся пена [16].

Как отмечалось ранее, угол контакта поверхности наночастиц для стабилизации пленки пены может быть между  $20^\circ$  и  $90^\circ$  [14] или оптимальные значения  $\theta$  могут изменяться от  $70^\circ$  до  $80^\circ$  [15]. Тесное соответствие между гидрофобностью частиц и пенообразованием позволяет заключить, что образование устойчивых пен возможно, когда угол контакта достигает  $80^\circ$  и более. Однако в работах [7, 8, 16] было показано, что наиболее устойчивые трехфазные пены были получены при гидрофобизации частиц кремнезема гексилaminом, соответствующей краевому углу  $45^\circ$ . Дальнейшего повышения краевого угла смачивания в щелочной среде при повышении концентрации гидрофобизатора не наблюдали. Отметим, что применение ультразвукового метода обработки исходных суспензий состава: кремнезем + гексилamin [17] позволяет повысить краевой угол смачивания частиц в щелочной среде и устойчивость образованной дисперсной системы. Как отмечалось, гидрофобизация твердой поверхности во многих случаях определяется химической реакцией гидрофобизатора с поверхностью. Результат таких взаимодействий часто определяется значением водородного показателя среды.

В частности, влияние водородного показателя было значительным при получении трехфазных пен, содержащих оксид титана в качестве твердого стабилизатора. Коллоидные частицы  $\text{TiO}_2$  имеют размеры 3–5 нм и обладают очень высокой поверхностной энергией. Высокое значение поверхностной энергии может приводить к образованию более крупных агрегатов в водной среде. Очевидно, что агрегативная устойчивость зольей может быть обусловлена снижением поверхностной энергии системы благодаря наличию на поверхности оксида титана двойного электрического слоя (ДЭС) и электростатического отталкивания частиц, которые характеризуются электрическими зарядами одинаковых знаков. Известно, что стабильность зольей характеризуется  $\zeta$ -потенциалом, на значение которого влияют: состав дисперсионной среды, гидролиз и природа электролита, который используется для поддержания определенного значения pH. Изoeлектрическая точка характеризуется тем, что при определенных условиях суммарный заряд частицы и значение  $\zeta$ -потенциала равны нулю. По данным исследования [18], изoeлектрическая точка оксида титана соответствует значению pH среды, равному 5,35.

Была получена и изучена зависимость  $\zeta$ -потенциала от pH на примере диоксида титана [19]. К исходному подкисленному раствору золя диоксида титана добавляли раствор гидроксида лития с концентрацией 0,2 моль/л. Анализ полученной зависимости показывает, что при возрастании значения водородного показателя золя меняет заряд (при этом ион гидроксония  $\text{H}_3\text{O}^+$  замещается на  $\text{OH}^-$ ) и проходит через ИЭТ (изoeлектрическая точка) при pH=5. По изменению  $\zeta$ -потенциала можно судить о дисперсионной стабильности зольей. Эту стабильность золя сохраняет при низких значениях водородного показателя (pH $\leq$ 4), а также при более высоких (pH $\geq$ 6). Таким образом, с практической точки зрения при классическом способе нейтрализации зольей с низким значением pH постепенное добавление щелочи до нейтральной реакции среды неизбежно приводит к прохождению через ИЭТ и коагуляции золя. При дальнейшем росте pH будут происходить перезарядка золя и его пептизация.

Исследование устойчивости пен, содержащих оксид титана, показало существенную зависимость возможности их образования и времени жизни от водородного показателя. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значениях водородного показателя pH=5, который соответствует ИЭТ точке оксида.

Т а б л и ц а 2

Влияние водородного показателя на время жизни пен

Массовое содержание $\text{TiO}_2$ , %	Относительная гидрофобизация $N_g$ , ммоль/г	pH	Время жизни пены	H, см
20	0,38	5	$t \geq 4$ суток	1
6	1,27	5	$t = 3$ суток	0,7
20	4,6	3	10 с	0,2
19,2	0,64	9	10 с	0,2

Как видно из табл. 2, пены сохраняли устойчивость в течение трех суток и более при постоянном значении водородного показателя, равном 5, и изменении относительной гидрофобности поверхности от 0,383 до 1,27 ммоль/г.

В табл. 2 показано также, что пена очень быстро разрушалась в кислой среде, при значениях водородного показателя 2 и 3. Установлено, что низкие ( $14,68^\circ$ ) значения краевого угла смачивания частиц оксида титана в кислой среде (при pH=2) могут являться причиной малой устойчивости формирующихся пен. Интересно отметить, что при pH=10 значение краевого угла смачивания было равно  $40,8^\circ$ , однако 50 % частиц-стабилизаторов имели среднее значение радиуса 3 мкм. Очевидно, стабилизация пен оксидом титана возможна при определенных значениях pH и степени коагуляции твердых частиц.

Подобным образом наиболее устойчивые дисперсные системы образовывались при значениях водородного показателя, который близок к изoeлектрической точке гид-

роксида алюминия. Известно, что растворы солей алюминия (сульфат алюминия, хлорид алюминия) образуют золи различного заряда при изменении реакции среды. В частности, при добавлении щелочи до pH = 5 образуется золя гидроксида алюминия. Точка нулевого заряда частиц  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , приготовленных выщелачиванием водорастворимых солей алюминия, равна 6,7. Отметим также, что пены получались только при добавлении масляной кислоты к раствору сульфата алюминия и дальнейшем изменении pH до 4,8–5 двумольным раствором гидроксида натрия [16]. При pH=4,8 наблюдался переход дисперсионной среды в гель в пенах, полученных из суспензий состава 10 %  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  + 0,6 % масляной кислоты через 30-40 мин от момента образования. Гелеобразование делает пену устойчивой к сжатию. Изменение объема в такой пене меньше по сравнению со свежеприготовленными пенами из суспензий составов 0,5 %  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и 0,3 %  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  с массовым содержанием масляной кислоты 0,3 %. Таким образом, увеличение концентрации твердых частиц вплоть до формирования гелеобразных структур (при концентрации сульфата алюминия, равной 10 %, и значении pH=4,8) делает пену более устойчивой к процессу деформации под действием избыточного (по сравнению с атмосферным) давления.

Таким образом, в ходе исследований доказано, что водородный показатель оказывает существенное влияние на процесс формирования и устойчивость пен, стабилизированных частицами различной химической природы. При этом гидрофобизация частиц кремнезема гексиламином всегда протекала в щелочной среде, а устойчивость пен возрастала при повышении степени относительной гидрофобизации поверхности твердой фазы до значения краевого угла смачивания  $45^\circ$ . Повышения краевого угла смачивания и образования устойчивой пены в щелочной среде из суспензии состава  $\text{SiO}_2$  + гексиламин при дальнейшем увеличении концентрации гидрофобизатора не наблюдали.

Стабилизация пен оксидом титана и гидроксидом алюминия была возможна только при значениях pH, близких к величинам изoeлектрических точек. Вероятно, частицы с низким зарядом и оптимальным краевым углом смачивания являются энергетически выгодными для их расположения на границе вода – газ и могут обеспечить устойчивость дисперсионной системы.

## Список литературы

1. Gonzenbach, U.T. Ultrastable particle-stabilized foams / U.T. Gonzenbach, R.R. Studart, E. Tervoort, L.J. Gauker // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* – 2006. – Vol.43. – P. 3526–3530.
2. Gonzenbach, U.T. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles / U.T. Gonzenbach, R.R. Studart, E. Tervoort, L.J. Gauker // *Langmuir.* – 2006. – Vol.22. – P. 10983–10988.
3. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials* – 2006. – Vol. 5. – P. 865-869.
4. Alargova, R.G. Foam superstabilization by polymer microrods / R.G. Alargova, D.S. Warhadpande, V.N. Paunov, O.D. Velev, // *Langmuir.* – 2004. – N 20. – P. 10371–10374.
5. Vilkova, N.G. Foam films stabilized by solid particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendeleev commun.* – 2011. – N 21. – P. 344–345
6. Vilkova, N.G. Effect of hexilamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by Ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendeleev commun.* – 2012. – № 22. – P.227–228
7. Vilkova, N.G. Influence of hydrofobized solid particles on the reduction of interface tension / N.G. Vilkova, A. V. Nushtaeva // *Mendeleev commun.* – 2013. – N 23. – P. 155–156.
8. Вилкова, Н.Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на свойства пен и пенных пленок / Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева // *Химия и химическая технология.* – 2013. – Т. 56(9). – С.62–69.

9. Нуштаева, А.В. Твердые стабилизаторы дисперсных систем: свойства и применение / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – №3 (часть 1). – С.64–67.
10. Нуштаева, А.В. Стабилизация пен и эмульсий нерастворимыми порошками / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова, С.И. Еланёва. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 132 с.
11. Нуштаева, А.В. Гидрофобизация частиц кремнезема различными катионными поверхностно-активными веществами / А.В. Нуштаева, Н.Г. Вилкова // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2021. – Т.63, № 3. – С. 22–29.
12. Sun, Q. Utilization of surfactant-stabilized foam for enhanced oil recovery by adding nanoparticles / Q. Sun, Z. Li, S. Li, L. Jiang, J. Wang, P. Wang. // *Energy and Fuels*. – 2014. – N 4 (28). – P. 2384–2394.
13. Binks, B.B. Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles / B.B. Binks, T.S. Horozov // *Angew. Chem.* – 2005. – N 44. – P. 3722–3725.
14. Kaptey, G. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2003. – Vol. 230, N 1-3. – P. 67–80.
15. Hunter, T.N. The role of particle in stabilising foams and emulsions / T.N. Hunter, R.J. Pugh, G.V. Franks, G.J. Jameson // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – N 137. – P. 57–81.
16. Мишина, С.И. Исследование устойчивости и синерезиса пен, стабилизированных частицами коллоидального кремнезема и гидроксида алюминия: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.11 / С.И. Мишина; Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова. – М., 2013. – 176 с.
17. Вилкова, Н.Г. Ультразвуковая обработка суспензий для получения устойчивых трехфазных пен и материалов с улучшенными свойствами / Н.Г. Вилкова, Г.А. Фокин, С.И. Мишина, Н.Н. Мазурин // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – №1(42). – С. 37–45
18. Kosmulski, M. The pH dependent surface charging and points of zero charge / M. Kosmulski // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 2018. – Vol. 251. – P. 115–138.
19. Бессуднова, Е.В. Синтез и исследование наноразмерных частиц диоксида титана для применения в катализе и нанобиотехнологиях: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04 / Е.В. Бессуднова; Институт катализа им. Г.К. Борескова. – Новосибирск, 2014. – 145 с.

## References

1. Gonzenbach, U.T. Ultrastable particle-stabilized foams / U.T. Gonzenbach, R.R. Studart, E. Tervoort, L.J. Gauker // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* – 2006. – Vol.43. – P. 3526–3530.
2. Gonzenbach, U.T. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles / U.T. Gonzenbach, R.R. Studart, E. Tervoort, L.J. Gauker // *Langmuir*. – 2006. – Vol.22. – P. 10983–10988.
3. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials* – 2006. – Vol. 5. – P. 865-869.
4. Alargova, R.G. Foam superstabilization by polymer microrods / R.G. Alargova, D.S. Warhadpande, V.N. Paunov, O.D. Velev, // *Langmuir*. – 2004. – N 20. – P. 10371–10374.
5. Vilkova, N.G. Foam films stabilized by solid particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendelev comm. – 2011. – N 21. – P. 344–345*
6. Vilkova, N.G. Effect of hexilamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by Ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelev comm. – 2012. – № 22. – P.227–228*
7. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of interface tension / N.G. Vilkova, A. V. Nushtaeva // *Mendelev comm. – 2013. – N 23. – P. 155–156.*

8. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobicity of silica particles on the properties of foam and foam films / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2013. – Vol. 56 (9). – P.62–69.
9. Nushtaeva, A.V. Solid stabilizers of disperse systems: properties and applications / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova // *Fundamental research*. – 2014. – N 3 (part 1). – P. 64–67.
10. Nushtaeva, A.V. Stabilization of foams and emulsions with insoluble powders / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova, S.I. Elaneva. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 132 p.
11. Nushtaeva, A.V. Hydrophobization of silica particles with various cationic surfactants / A.V. Nushtaeva, N.G. Vilkova // *Izvestiya vuzov. Chemistry and chemical technology*. – 2021. – Vol. 63, N 3. – P. 22–29.
12. Sun, Q. Utilization of surfactant-stabilized foam for enhanced oil recovery by adding nanoparticles / Q. Sun, Z. Li, S. Li, L. Jiang, J. Wang, P. Wang. // *Energy and Fuels*. – 2014. – N 4 (28). – P. 2384–2394.
13. Binks, B.B. Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles / B.B. Binks, T.S. Horozov // *Angew. Chem.* – 2005. – N 44. – P. 3722–3725.
14. Kaptey, G. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2003. – Vol. 230, N 1-3. – P. 67–80.
15. Hunter, T.N. The role of particle in stabilising foams and emulsions / T.N. Hunter, R.J. Pugh, G.V. Franks, G.J. Jameson // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – N 137. – P. 57–81.
16. Mishina, S.I. Study of stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: dis. ... cand. chem. sciences / S.I. Mishina; Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov. – М., 2013. – 176 p.
17. Vilkova, N.G. Ultrasonic treatment of suspensions to obtain stable three-phase foams and materials with improved properties / N.G. Vilkova, G.A. Fokin, S.I. Mishina, N.N. Mazurin // *Regional architecture and engineering*. – 2020. – N 1 (42). – P. 37–45
18. Kosmulski, M. The pH dependent surface charging and points of zero charge / M. Kosmulski // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 2018. – Vol. 251. – P. 115–138.
19. Bessudnova, E.V. Synthesis and research of nanosized particles of titanium dioxide for use in catalysis and nanobiotechnology: diss. ... cand. chem. sciences: 02.00.04 / E.V. Bessudnova; Institute of Catalysis. G.K. Borekova. – Novosibirsk, 2014. – 145 p.

# АРХИТЕКТУРА ARCHITECTURE

УДК [05 +378.4]:69(470.40)

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

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@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

**Eremkin Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

## ВКЛАД ЖУРНАЛА «РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО» И УЧЕНЫХ ПЕНЗЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА В РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.И. Ерёмкин

*Статья посвящается 15-летию  
со дня выхода в свет журнала  
«Региональная архитектура и строительство»*

Представлен анализ многолетних научно-технических разработок, выполненных учеными университета и внедрённых в архитектурно-строительный комплекс, жилищно-коммунальное хозяйство и другие отрасли экономики Пензенской области. Научные исследования проводились учеными университета в рамках реализации федеральных и региональных программ с привлечением молодых ученых, студентов и отраслевых специалистов. Полученные результаты активно использовались в учебном процессе при подготовке высококвалифицированных специалистов.

*Ключевые слова: регион; журнал; экономика; научно-технические достижения; ученые региона; вклад ученых; внедрение; строительные кадры*

АРХИТЕКТУРА

## CONTRIBUTION OF THE JOURNAL «REGIONAL ARCHITECTURE AND ENGINEERING» AND SCIENTISTS OF THE PENZA STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION IN THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY OF THE PENZA REGION

A.I. Eremkin

*The article is dedicated to the 15th anniversary  
of the journal «Regional architecture and engineering»*

The article presents an analysis of long-term scientific and technical achievements of university scientists within the framework of scientific schools that were into the construction industry, housing and communal services and in the field of architecture of the Penza region. The presented research studies were carried out by university scientists to implement federal and regional programs with the involvement of young scientists, students and industry specialists. The results obtained were actively used in the teaching of bachelors, masters, graduate students and doctoral students of the university.

*Keywords: region, journal, economy, scientific and technical achievements, scientists of the region, contribution of scientists, implementation, construction personnel*

Начало XXI века – это период больших перемен в жизни Пензенской области: регион нуждался в строительных кадрах, новых технологиях и строительных материалах, высокоэффективных конструкциях и современных архитектурных решениях, энергосберегающих технологиях.

Активно включились в решение данных задач ученые нашего университета. В своей многогранной деятельности они опирались и опираются на передовые, принципиально новые направления развития строительной науки, техники и производства.

По результатам научных исследований ученые ПГУАС публикуют свои труды в российских и зарубежных изданиях, выступают с докладами на международных и всероссийских конференциях. Расширяется сотрудничество между университетом и зарубежными научными и образовательными учреждениями по вопросам подготовки кадров и проведения совместных научных исследований.

Для популяризации и внедрения научных и опытно-конструкторских разработок ученых вуза в строительном комплексе региона возникла острая необходимость в издании собственного журнала.

В 2006 году вышел первый номер журнала «Региональная архитектура и строительство» (Свидетельство о регистрации ПИ № 77-25956 от 13.10.2006 г.). Этому событию предшествовала большая организационная работа при поддержке органов исполнительной власти региона. Издание собственного журнала было также обусловлено необходимостью публикации результатов научных исследований ученых, соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, специалистов строительной отрасли для распространения передового опыта работы.

На момент открытия журнала в вузе активно действовали научные школы Прошина А.Н., Барановой Т.И., Калашникова В.И., Логаниной В.И., Круглякова П.М., Грейсуха Г.И., Гришина Б.М., Королева Е.В., Кошева А.Н., Майорова В.А., Аверкина А.Г., Ерёмкина А.И., Круглова Ю.В., Бобрышева А.Н., Резника С.Д., Данилова А.М., Макридина Н.И., Нежданова К.К. и др.

Важно, чтобы результаты исследований наших ученых были доступны для научной общественности и специалистов строительной отрасли нашего и других регионов. Наряду с научными школами в вузе работало около 70 докторов наук и профессоров, многие из которых проводили научные исследования, результаты которых были интересны для ученых, выполнявших родственные исследования, и полезны для социально-экономического развития Пензенской области. Строительная отрасль региона начинала активно развиваться, внедрялись результаты научных исследований вуза в производство [6, 7].

Для подготовки кадров высшей квалификации – докторов и кандидатов наук – в нашем учебном заведении работали 3 диссертационных совета и один объединенный

совет (совместно с Орловским университетом). В этих советах защиты диссертаций осуществлялись по 10 специальностям.

Журнал уже в первые годы работы получил признание у научной общественности, многие ученые стремились опубликовать результаты своих научных исследований в нашем журнале. Он включен в перечень журналов ВАК, входит в ядро РИНЦ, включен в платформу Wos и Scopus, имеет высокий импакт-фактор.

Хранителем научной чистоты публикаций стал главный редактор журнала, д.т.н., профессор Данилов А.М. совместно с редколлегией. Многие авторы помнят, какие строгие требования предъявлялись к их статьям.

Необходимо отметить особо активных авторов, публикующих в последние годы свои научные труды в нашем журнале – это Аверкин А.Г., Андреев С.Ю., Береговой А.М., Береговой В.А., Болдырев С.А., Гарькина И.А., Грейсух Г.И., Гришин Б.М., Данилов А.М., Еремкин А.И., Королев Е.В., Королева Л.А., Кошев А.Н., Логанина В.И., Лянденбургский В.В., Макридин Н.И., Нежданов К.К., Резник Г.А., Резник С.Д., Родионов Ю.В., Сафьянов А.Н., Тараканов О.В., Тарасов Р.В., Толушов С.А., Хрусталева Б.Б., Шеин А.И. и др.

Авторитету журнала способствуют активная поддержка со стороны ректора Болдырева С.А., проректора по НР Сафьянова А.Н.

За последние годы университет стал одним из ведущих образовательных и научных центров как в регионе, так и в России [3, 4, 5] с кадровым потенциалом, обеспечивающим подготовку высококвалифицированных специалистов для архитектурно-строительного комплекса, жилищно-коммунального хозяйства, дорожного строительства и других отраслей рыночной экономики. Значительную роль в этом сыграли и издание журнала «Региональная архитектура и строительство».

В последние годы активно проводятся учеными университета научно-исследовательские работы по заданиям хозяйствующих субъектов, органов исполнительной власти различных уровней. Были выполнены работы в рамках приоритетных национальных проектов «Доступное и комфортное жильё – гражданам России», «Безопасные и качественные дороги» и «Безопасная и комфортная среда», что способствовало социально-экономическому развитию Пензенского региона [6, 7, 8]. За 2015–2016 годы по заданию ООО «Азия Цемент» был реализован комплекс проектных и изыскательских разработок при строительстве автомобильной дороги в объезд г. Никольска в Никольском районе, Пензенской области (рис. 1).



Рис. 1. Движение по автодороге в объезд Никольска

Разработана проектная документация на строительство двух общеобразовательных школ модульного типа на 660 мест в мкр. Шуист (г. Пенза) и 18 мкр. ЗАТО г. Заречный (рис. 2, 3).



Рис. 2. Школа модульного типа в мкр. Шуист



Рис. 3. Проект школы модульного типа в ЗАТО г.Заречный, 18 мкр.

Осуществлена разработка новых конструктивных решений, интерьеров помещений, дизайна среды и основных принципов перспективного развития Пензенского зоопарка и ПКиО «Комсомольский» в рамках подготовки к празднованию 350-летия города Пензы (рис. 4, 5).

Под руководством доцента Трегуба А.Ю. проведена корректировка ранее разработанной проектно-сметной документации по объекту «Пензенский государственный цирк» (рис. 6).



Рис. 4. Архитектурное решение Пензенского зоопарка



Рис. 5. Архитектурное решение ПКиО «Комсомольский»



Рис. 6. Строительство Пензенского цирка

В 2020 году в рамках программы «Комплексное развитие сельских территорий Пензенской области» № 778-пП от 11 декабря 2019 года по заданию общества с ограниченной ответственностью «ПензаМолИнвест» (группа компаний «Дамате») университетом разработана проектно-сметная документация на строительство объекта малоэтажной застройки «Жилые помещения (жилые дома), предоставляемые гражданам, проживающим и работающим на сельских территориях, по договору найма жилого помещения, в с. Кривошеевка, Нижнеломовского района, Пензенской области» (рис. 7).

По договору с Фондом защиты прав граждан – участников долевого строительства Пензенской области проведена большая комплексная работа по экспертной оценке состояния основных несущих строительных конструкций объекта незавершенного строительства, расположенного по адресу: г. Пенза, ул. Пушкина, д. 2, – с целью определения их технического состояния и видов работ, необходимых для завершения строительства и ввода объекта в эксплуатацию. Разработан проект усиления основных несущих конструкций и выполнена корректировка основных разделов проектной документации (рис. 8).

По муниципальным контрактам, заключенным с муниципальными казёнными учреждениями «Департамент ЖКХ г.Пензы» и «Управление капитального строительства г. Пензы», проводилась экспертная оценка качества выполнения работ по ремонту автомобильных дорог и тротуаров на улично-дорожной сети города Пензы. Работы выполнялись под руководством профессора кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки» Саденко С.М. и заведующего кафедрой «Механизация и автоматизация производства» Романенко И.И.



Рис. 7. Малоэтажные жилые дома в с.Кривошеевка



Рис. 8. Строительство жилого дома по ул.Пушкина, д. 2, г.Пенза

Заведующей кафедрой «Градостроительство» Херувимовой И.А. и заведующим кафедрой «Дизайн» Герасимовым В.П. проведен градостроительный анализ и разработаны архитектурные концепции формирования комфортной городской среды общественных территорий, дизайн-проекты и паспорта благоустройства территорий общего пользования в муниципальных поселениях Пензенской области (города Пенза, Нижний Ломов, Заречный, села Наровчат, Малая Сердоба, Лопатино и Русский Камешкир, рабочие поселки Сосновоборск, Земетчино, Беково, Исса) (рис. 9).



Рис. 9. Дизайн-проект благоустройства общественной территории «Лесопарковая зона» (г.Заречный)

На кафедрах «Механика» (руководитель работ А.И. Шеин) и «Городское строительство и архитектура» (руководители работ А.В. Гречишкин и Л.Н. Петрянина) интенсивно велись работы по подготовке проектно-сметной документации на текущий и капитальный ремонт различных объектов, входящих в социальную инфраструктуру административных поселений (объекты культурного назначения, сферы ЖКХ, сферы услуг, учреждения систем здравоохранения, дошкольного воспитания, образования, организации и предприятия, связанные с досугом и отдыхом, общественным питанием, розничной торговлей, спортивно-оздоровительные учреждения и др.) (рис. 10).



Рис. 10. Жилые дома в микрорайоне «Заря»

Большая работа проведена профессором Андреевым С.Ю. по экспериментальным исследованиям и разработке технологий очистки сточных вод различных предприятий (ОАО «Маяк», «ПО «Старт» (г. Заречный), ПФ «Васильевка», ОАО «НПП Рубин»).

По заданию ООО «Горводоканал» г. Пензы под руководством профессора Гришина Б.М. выполнены экспериментальные исследования по разработке экономически выгодных способов коагулирования при возврате промывных вод фильтров в очистные сооружения, а также реагентосберегающего способа комбинированной коагуляции воды Сурского водохранилища (рис. 11).



Рис. 11. Обследование очистных сооружений

Доцентом Кочергиным А.С. разработаны схемы водоснабжения и водоотведения городов Сердобска, Каменки и поселения Воскресеновка Пензенского района.

Профессорами кафедры ТГВ Еремкиным А.И. и Королевой Т.И., доц. Леонтьевым В.А. в рамках муниципальных контрактов разработаны и в дальнейшем актуализированы схемы теплоснабжения городов Нижнего Ломова, Каменки, Кузнецка и Сердобска, сельских поселений Золотаревки и Богословки.

В настоящее время в ПГУАС выполняются проектные работы по муниципальным контрактам, заключенным с муниципальным казённым учреждением «Управление капитального строительства г. Пензы»:

- Строительство общегородской магистрали от II микрорайона Арбеково до микрорайона малоэтажной застройки «Заря» в г. Пензе с примыканием к федеральной дороге М-5 «Урал».

- Спортивный комплекс «Пенза» (г. Пенза, ул. Гагарина, 1а).
- Автомобильная дорога, соединяющая пр. Строителей и пр. Победы в районе торгового центра «Коллаж», г. Пенза.
- Проведение строительного контроля на объекте «Строительство домов для переселения граждан из аварийного жилья» (г. Пенза) в квартале, ограниченном улицами Беляева-Литейная-Ударная-Воровского» (II этап), жилые дома 3, 4 и 5, а также на объекте «Крытый каток с искусственным льдом по ул. 65-летия Победы, 8 мкр. Арбеково, г. Пенза» (руководитель И. И. Романенко).
- Научно-исследовательская работа по внесению изменений в текстовую и графическую части Схемы территориального планирования Бессоновского района Пензенской области.

Важно отметить, что результаты работы по перечисленным выше направлениям нашли отражение в публикациях журнала «Региональная архитектура и строительство» и других журналах. Авторами разработок и публикаций стали: А.Ю. Трегуб, С.Н. Саденко, И.И. Романенко, И.А. Херувимова, В.П. Герасимов, А.И. Шеин, А.В. Гречишкин, Л.Н. Петрянина, С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.С. Кочергин, Т.И. Королева, А.И. Еремкин и др.

Выпуски журнала будут и в дальнейшем содействовать росту научного потенциала вуза и внедрению в производство результатов исследований в области строительства и архитектуры, направленных на развитие экономики Пензенской области.

Публикуемый в журнале инновационный материал способствует повышению качества учебного процесса по подготовке специалистов, востребованных на рынке труда в современных условиях.

От своего имени желаю нашему журналу «Региональная архитектура и строительство» дальнейших творческих успехов, вхождения в международные реферативные базы данных и системы цитирования WoS и Scopus. Выражаю признательность за оказанную помощь в подготовке статьи Сафьянову А.Н., Тамбовцеву Е.Н., Гарькиной И.А.

#### Список литературы

1. Михеев, А.П. Профессора университета / А.П. Михеев, С.Д. Резник, А.И. Еремкин. – Пенза: Родной дом, 2008. – 161 с.
2. Королев, Е.В. Научная школа А.П. Прошина / Е.В. Королев, А.Н. Бормотов. – Пенза: ПГТА, 2010. – 83 с.
3. Еремкин, А.И. Пензенская государственная архитектурно-строительная академия / А.И. Еремкин, А.П. Михеев. – Пенза: Пензенская правда, 2002. – 491 с.
4. Михеев, А.П. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (1958-2008 гг.) / А.П. Михеев, А.И. Еремкин. – Пенза: Родной дом, 2008. – 311 с.
5. Михеев, А.П. От факультета до университета / А.П. Михеев. – Самара: Спринт, 2005. – 287 с.
6. Иванов, В.С. Союз строителей / В.С. Иванов. – Пенза: ПГУАС, 2007. – 227 с.
7. Журавлев, В.М. Время большого строительства / В.М. Журавлев. – Пенза: Пензенская правда, 2010. – 399 с.
8. Баронин, С.А. Развитие национальных проектов на основе контрактов на жизненные циклы по объектам капитального строительства / С.А. Баронин, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2. – С. 100–108.

#### References

1. Mikheev, A.P. University professors / A.P. Mikheev, S.D. Reznik, A.I. Eremkin. – Penza: Native House, 2008. – 161 p.

2. Korolev, E.V. Scientific school of A.P. Proshin / E.V. Korolev, A.N. Bormotov. – Penza: PGTA, 2010. – 83 p.
3. Eremkin, A.I. Penza State Academy of Architecture and Civil Engineering / A.I. Eremkin, A.P. Mikheev. – Penza: Penzenskaya Pravda, 2002. – 491 p.
4. Mikheev, A.P. Penza State University of Architecture and Construction (1958-2008) / A.P. Mikheev, A.I. Eremkin. – Penza: Native House, 2008. – 311 p.
5. Mikheev, A.P. From faculty to university / A.P. Mikheev. – Samara: Sprint, 2005. – 287 p.
6. Ivanov V.S. Union of Builders / Ivanov V.S. Ivanov. – Penza: PGUAS, 2007. – 227 p.
7. Zhuravlev, V.M. Time for big construction / V.M. Zhuravlev. – Penza: Penza Pravda, 2010. – 399 p.
8. Baronin, S.A. Development of national projects on the basis of contracts for life cycles for capital construction objects / S.A. Baronin, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 2. – P. 100–108.

УДК [72+69]: 620.91 – 049.35

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

**Береговой Александр Маркович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Городское  
строительство и архитектура»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

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

**Beregovoy Aleksander Markovich**,  
Doctor of Sciences,  
Professor of the department «Urban  
Construction and Architecture»  
E-mail: ambereg@rambler.ru

## СТЕНЫ СО СВОЙСТВАМИ ЭНЕРГОАКТИВНОСТИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ПОМЕЩЕНИЙ

А.М. Береговой

Исследованы эффективные способы использования в зданиях энергии солнечной радиации и утилизации тепла уходящего воздуха. Для создания энергоактивных участков в конструкциях наружных стен применены простые по изготовлению технические устройства и общедоступные материалы. Выполнены экспериментальные исследования и расчетное моделирование по оценке тепловой эффективности светопрозрачных кровельных слоев и энергоактивных модулей стен, а также теплоаккумулирующей способности конструкции массивной стены с лучепрозрачным экраном. Разработаны расчетные модели по тепловой эффективности вентилируемых воздушных прослоек с целью утилизации тепла уходящего воздуха и по инфильтрации воздуха в конструкциях стен, имеющих различное сопротивление воздухопроницанию. Для каждого способа определен приблизительный энергосберегающий эффект.

*Ключевые слова: массивная стена, энергоактивные участки стен, вентилируемая прослойка, утилизация тепла помещений, инфильтрация воздуха*

## WALLS WITH ENERGY ACTIVITY PROPERTIES AND UTILIZATION OF INDOOR HEAT

A.M. Beregovoy

Efficient ways of using solar radiation energy in buildings and utilizing the heat of outgoing air have been investigated. To create energy-active sections in structures of outer walls technical devices are used, that are simple to manufacture and publicly available materials. Experimental studies and computational modeling were carried out on the thermal efficiency of translucent cover layers and energy-active wall modules, as well as on the heat storage capacity of the structure of a massive wall with a radiant screen. Calculation models have been developed for the thermal efficiency of ventilated air layers for the purpose of utilizing the heat of the outgoing air and for air infiltration in wall structures with different resistance to air permeation. An approximate energy saving effect has been determined for each method.

*Keywords: massive wall, energy-active sections of walls, ventilated interlayer, heat recovery of rooms, air infiltration*

В практике проектирования и строительства с целью повышения энергоактивных свойств стеновых конструкций и утилизации тепла вытяжного воздуха применяют специальные технические устройства (солнечные батареи, плоские солнечные коллекторы, теплообменники-утилизаторы тепла, тепловые насосы), которые отличаются высокой стоимостью (от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч рублей) и значительными эксплуатационными расходами. В работах [1, 2] рассматривается проблема утилизации тепла вытяжного воздуха и вторичных энергоресурсов с помощью

энергоёмких механической приточно-вытяжной вентиляции и теплонасосной установки.

Более экономичные конструктивные решения присущи энергоактивным ограждениям, выполненным по типу стены Тромба. Математическая модель такой конструкции со светопрозрачными и теплоизоляционными слоями, воздушной прослойкой, теплоприёмной пластиной и воздушными каналами приведена в [3]. Системный анализ энергоэкономичных конструктивных решений наружных ограждений дан в [4].

В настоящей работе приводятся результаты исследований по разработке эффективных способов использования энергии солнечной радиации и утилизации тепла уходящего воздуха. Особенность данных способов заключается в том, что объектом исследования являлась наружная стена, в энергоактивных участках которой использованы простые по изготовлению технические устройства и общедоступные материалы.

Для повышения энергоактивных свойств конструкций стен были проведены исследования по оценке тепловой эффективности светопрозрачных кровельных слоев и энергоактивных участков наружных ограждений, а также теплоаккумулирующей способности конструкции массивной стены с лучепрозрачным экраном. С целью утилизации тепла уходящего воздуха разработаны расчетные модели по тепловой эффективности вентилируемых воздушных прослоек и по инфильтрации воздуха в конструкциях стен, имеющих различное сопротивление воздухопроницанию.

Отделочные слои наносят на наружную поверхность стен обычно для улучшения эстетических качеств фасадов и увеличения долговечности материала конструкции. Проведенный эксперимент был посвящен исследованию другой функции отделочных слоев – оценке способности к восприятию тепла солнечной радиации. Для этой цели в испытательную камеру помещались тонкостенные керамические пластины толщиной 4 мм с нанесенным 2-слойным светопрозрачным покрытием из полистирольного лака, слоя битого стекла (фракция 0,5 ... 1,5 мм) по основанию из этого лака, а также два контрольных образца: без покрытия и со слоем из полиэтиленовой пленки с воздушным промежутком в 5 мм. Перед проведением эксперимента предполагалось, что наличие многочисленных воздушных пузырьков в составе лака, сохраняющихся при его нанесении на поверхность и в процессе последующей эксплуатации, обеспечит больший прогрев пластины и находящейся под ней воздушной прослойки.

Результаты эксперимента показали, что в условиях солнечной инсоляции при температуре наружного воздуха 10 ... 15°C в апреле максимальные температуры нагрева  $t_{\text{макс}}$  воздушной прослойки под пластинами составили 34 ... 40°C. По отношению к контрольному образцу без покрытия значения  $t_{\text{макс}}$  были больше на 4, 11, 21 % соответственно для образцов со слоями из битого стекла, двойного полистирольного покрытия и контрольного образца с полиэтиленовой пленкой.

Анализ полученных результатов позволил уточнить область применения варианта ограждения из тонкой пластины с покрытием из полистирольного лака, который показал при испытаниях хорошую энергоактивность: его можно использовать только для тонкостенных ограждений, например, в виде навесных фасадов, ориентированных на солнечную сторону горизонта.

В работе [5] рассмотрена энергетическая эффективность конструкции «массивная стена» с наружным лучепрозрачным экраном для случая, когда ее теплоаккумулирующая способность  $Q_c$  и доля солнечного тепла в тепловой нагрузке здания достаточны для удовлетворения потребности помещения в отоплении:

$$Q_c = \gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t (q_k + q_{\text{вент}}) \cdot (t_b - t_n) / (t_n^y - t_b) \lambda, \quad (1)$$

$$(t_n^y - t_b) \cdot k \cdot F = (q_k + q_{\text{вент}}) \cdot (t_b - t_n). \quad (2)$$

Однако с учетом климатических условий на большей части территории нашей страны основная часть тепловой нагрузки здания  $Q_{\text{осн}}$  приходится на обычную систему отопления в виде концентрированной энергии, а доля солнечного тепла незначительна:

$$Q_{\text{осн}} = (q_k + q_{\text{вент}}) \cdot (t_b - t_n) - (t_n^y - t_b) \cdot k \cdot F \cdot z, \quad (3)$$

$$Q_{\text{осн}} = (q_k + q_{\text{вент}}) \cdot (t_b - t_n) - \frac{(t_n^y - t_b) \lambda \cdot Q_c}{\gamma \cdot c \cdot \delta^2 \cdot \Delta t}. \quad (4)$$

Анализ полученных результатов и последующие экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные энергоактивные ограждения обладают сравнительно небольшой тепловой эффективностью. Это объясняется тем, что поток солнечной радиации, проникающий через лучепрозрачное ограждение, в основном рассеивается в атмосферу и только часть его поглощается массивом стены, в том числе ее теплоаккумулирующим слоем, при его движении к внутренней поверхности по принципу затухания температурной волны.

2. В конструктивном решении «массивная стена» малая скорость конвективного движения воздушного теплоносителя по каналам и относительно небольшая температура нагрева зачерненной поверхности стены не обеспечивают существенного прогрева воздуха на выходе из канала в помещение.

3. Для достижения более интенсивного поступления нагретого воздуха в воздушную среду помещения необходимо предусмотреть в конструкции такого ограждения систему каналов и механический приток воздуха.

С целью дальнейшего повышения энергоактивности стенового ограждения была разработана простейшая конструкция модуля в виде теплоизоляционного кожуха, экранированного двухслойным остеклением с воздушной прослойкой и зачерненным волнообразным металлическим адсорбером из листового железа [6]. Натурные испытания позволили определить область применения и оценить энергосберегающий эффект модуля:

- область применения – малоэтажные здания;
- географическое положение района строительства – II климатический район;
- доля тепла солнечной радиации в общей тепловой нагрузке индивидуального дома в зависимости от площади такой конструкции находилась в пределах 5...15 %.

Расчетные модели по тепловой эффективности вентилируемых воздушных прослоек и по инфильтрации воздуха в конструкциях стен позволили оценить процесс утилизации тепла уходящего воздуха помещений.

Первая модель применима к наружной стене многоэтажного здания и рассматривает утилизацию тепла в воздушной прослойке, отделенной от внутренней воздушной среды металлической пластиной толщиной 1,5–2 мм: забор наружного воздуха осуществляется в нижней части ограждающей конструкции, а выход – через приточное отверстие помещения. Температура  $t_x$  в сечении  $x$  прослойки, коэффициент теплообмена  $\alpha_k$  и количество проходящего через прослойку воздуха  $G$  определялись по следующим уравнениям [7]:

$$t_x = t_c - (t_c - t_n) \cdot e^{-Ax}, \quad (5)$$

$$A = \alpha_k \cdot D_0 / (G \cdot c), \quad (6)$$

$$\alpha_k = 3,25 \cdot \delta_{\text{пр}}^{-0,2} \cdot \gamma_{\text{пр}}^{0,8}, \quad (7)$$

$$G = v_{\text{пр}} \cdot \rho \cdot \delta_{\text{пр}} \cdot \delta_{\text{пр}}^1. \quad (8)$$

Результаты расчета показали, что энергосберегающий эффект зависит от высоты прослойки (этажности здания) и температуры наружного воздуха: при поступлении в прослойку наружного воздуха с  $t_n = -20$  °C он может составить для одно-, трех- и пятиэтажного зданий 11, 33 и 48 % соответственно.

Вторая модель рассматривает процесс нагрева инфильтрационного потока воздуха в массиве наружной стены уходящим из помещения тепловым потоком, что приводит

к уменьшению объема холодного приточного воздуха в системе естественной вентиляции и появлению энергосберегающего эффекта.

По нижеприведенным аналитическим выражениям определялись: величина теплового потока на внутренней поверхности ограждения  $q_n$  при инфильтрации холодного воздуха, разница давлений воздуха с внешней и внутренней сторон ограждения  $\Delta P$ , Па, количество инфильтрующегося воздуха  $w_{инф}$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч), величина уменьшения количества тепла на подогрев части необходимого объема вентиляционного воздуха в результате экономайзерного эффекта  $\Delta Q$  [8]:

$$q_n = \frac{c_b \cdot w \cdot e^{c_b \cdot w \cdot R}}{e^{c_b \cdot w \cdot R_0} - 1} \cdot (t_b - t_n), \quad (9)$$

$$\Delta P = -0,8 \cdot \left[ -g \cdot (\gamma_n - \gamma_b) \cdot H - 0,6 \frac{(0,6 \cdot v)^2 \cdot \gamma_n}{2} \right], \quad (10)$$

$$w_{инф} = \frac{\Delta P}{\sum R_n}, \quad (11)$$

$$\Delta Q_{вент} = 0,28 \cdot \Delta w_{вент} \cdot \gamma_n \cdot c_b \cdot (t_b - t_n). \quad (12)$$

Расчет экономии тепла для 12-этажного дома по формулам (9)–(12) показал, что экономия тепла  $Q_{эк}$  с учетом возникающего экономайзерного эффекта может достигнуть 10 %, если конструкция ограждения имеет относительно небольшое сопротивление воздухопроницанию (кирпичная кладка на цементно-шлаковом растворе, керамзитобетон с плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>, шлакопемзобетон и др.). Для 2-этажного дома с аналогичными конструкциями стены величина  $Q_{эк}$  не превысила 3 %.

Таким образом, результаты исследований показали, что рассмотренные способы по повышению энергоактивности и по утилизации тепла вытяжного воздуха могут обеспечить ощутимый энергосберегающий эффект без использования дорогостоящих устройств и материалов при соблюдении ряда условий:

- способ с нанесением покрытия из полистирольного лака используется только для тонкостенных навесных ограждений с воздушной прослойкой по аналогии с конструкцией навесного фасада, ориентированного на солнечную сторону горизонта;
- в конструктивном решении инсолируемой «массивной стены» для более интенсивного поступления нагретого воздуха в воздушную среду помещения необходимо предусмотреть систему каналов и механический приток воздуха;
- энергоактивный участок стены применим для малоэтажных зданий в условиях II климатического и более южных районов страны. При этом тепловая эффективность этой конструкции возрастает с увеличением ее площади на фасаде здания;
- энергосберегающий эффект при утилизации тепла в конструкции стены с воздушной прослойкой, отделенной от помещения тонкой металлической пластиной, возрастает с увеличением высоты прослойки и может составить для помещения 5-этажного здания 48 % при наружной температуре –20 °С;
- повышение этажности здания и регулирование микроструктуры наружного ограждения путем уменьшения сопротивления воздухопроницанию позволяет при инфильтрации воздуха обеспечить за счет экономайзерного эффекта уменьшение тепловых потерь (например, для 12-этажного дома на 10 %).

#### Список литературы

1. Васильев, Г.П. Концепция повышения энергоэффективности многоквартирных жилых домов за счет утилизации тепла вторичных энергоресурсов / Г.П. Васильев, А.Н. Дмитриев, В.Ф. Горнов [и др.]. – URL: cyberleninka.ru (дата обращения 24.09.21).

2. Хужаев, П.С. Повышение энергоэффективности зданий при условии утилизации тепла вытяжного воздуха / П.С. Хужаев, Р.С. Назаров, А. Алимардонов [и др.]. – URL: cyberleninka.ru (дата обращения 24.09.21).

3. Турулов, В.А. Использование солнечной энергии в строительстве зданий / В.А. Турулов. – URL: www.abok.ru (дата обращения 24.09.21).

4. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплопотерь через энергосберегающие наружные ограждения / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 5. – С. 57–61.

5. Береговой, А.М. Теплоаккумулирующие свойства энергоактивной стены в системе естественной вентиляции и отопления здания / А.М. Береговой, В.А. Береговой, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №1. – С. 74–77.

6. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции, адаптированные к использованию энергии природной среды / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой, А.В. Гречишкин // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 2. – С.4–8.

7. Мальцев, А.В. Наружное ограждение, утилизирующее тепло уходящего воздуха из помещения / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №1. – С. 123–127.

8. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – С. 140–144.

#### References

1. Vasiliev, G.P. The concept of increasing the energy efficiency of multi-apartment residential buildings through the utilization of heat from secondary energy resources / G.P. Vasiliev, A.N. Dmitriev, V.F. Gornov [etc.]. – URL: cyberleninka.ru (date of access 24.09.21).

2. Khuzhaev, P.S. Improving the energy efficiency of buildings subject to the utilization of heat from the exhaust air / P.S. Khuzhaev, R.S. Nazarov, A. Alimardonov [etc.]. – URL: cyberleninka.ru (date of access 09.24.21).

3. Turulov, V.A. The use of solar energy in the construction of buildings / V.A. Turulov. – URL: www.abok.ru (accessed 24.09.21).

4. Beregovoy, A.M. Performance indicators in the system analysis of the heat losses through the exterior enclosure structures / A.M. Beregovoy, O.L. Viktorova, V.A. Beregovoy // News of higher educational institutions. – 2009– No. 5. – P. 57–61.

5. Beregovoy, A.M. Heat storage properties of an energy-active wall in the natural ventilation and heating system of a building / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 1. – P. 74–77.

6. Beregovoy, A.M. Outside enclosing structures adapted to the use of the energy of the natural environment / A.M. Beregovoy, A.P. Proshin, V.A. Beregovoy, A.V. Grechishkin // News of higher educational institutions / Construction. – 2005. – No. 2. – P.4–8.

7. Maltsev, A.V. Enclosure structures utilizing removed room air heat / A.V. Maltsev, A.M. Beregovoy, V. A. Beregovoy, M.A. Derina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No.1. – P. 123–127.

8. Beregovoy, A.M. The effect of energy saving in room with natural ventilation in terms of air infiltration through exterior wall / A.M. Beregovoy, A. V. Maltsev, M.A. Derina, A.V. Grechishkin // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – С. 140–144.

УДК 72.025.4:691.2

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

**Береговой Виталий Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Лавров Иван Юрьевич**,  
аспирант

**Капустин Андрей Егорович**,  
аспирант  
E-mail: techbeton@pguas.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

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

**Beregovoy Vitaliy Aleksandrovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
department «Technology of Building Materials  
and Wood Processing»  
E-mail: vabereg@rambler.ru

**Lavrov Ivan Yurievich**,  
Postgraduate

**Kapustin Andrey Egorovich**,  
Postgraduate  
E-mail: techbeton@pguas.ru

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РЕСТАВРАЦИИ АРХИТЕКТУРНО- СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ\*

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А. Е. Капустин

Рассмотрены технологические аспекты практической реализации процессов восстановления архитектурных элементов при реставрации исторических объектов способами биоцементации и цифрового прототипирования. Разработан алгоритм использования методов дифференциально-термического, химического и петрографического анализов для экспресс-оценки компонентного состава затвердевших растворов, ранее применявшихся при строительстве объектов культурного наследия.

*Ключевые слова:* прототипирование, биоцементация, аутентичность состава, химический и фазовый анализ материалов, реставрация исторических объектов

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF STONE ELEMENTS DURING THE RESTORATION OF ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION OBJECTS

V.A. Beregovoy, I.Y. Lavrov, A. E. Kapustin

The technological aspects of the practical implementation of the processes of restoration of architectural elements during the restoration of historical objects by means of biocementation and digital prototyping are considered. An algorithm has been developed for using differential thermal, chemical and petrographic analysis methods for rapid assessment of the component composition of solidified solutions used in the construction of cultural heritage sites.

*Keywords:* prototyping, biocementation, authenticity, chemical and phase analysis of materials, restoration of historical objects

**Введение.** В настоящее время активно проводится реставрация строительных объектов, имеющих историко-культурную ценность. В этой связи актуальной становится задача быстрого воссоздания частично утраченных элементов каменного декора различного назначения или восстановления целостности поверхностных слоев.

При реставрационных работах возможны два граничных случая. Первый, когда имеется исторический фрагмент декора, который состоит из повторяющихся эле-

\* Лабораторные исследования выполнялись в рамках НИР №21-20 от 07.04.2021 г.

ментов – раппорт, или идентичных, и при котором нужно воссоздать отдельно утраченные части. В этом случае применяют способ изготовления типовых оттисков путем снятия копий с сохранившихся элементов и последующего восстановления целостности методом набивки или заливки из аутентичных материалов.

Второй случай отличается большей трудоемкостью и предусматривает проведение полного цикла воссоздания практически утерянного фрагмента по имеющимся архивным данным реставрируемого или схожего объекта.

К сожалению, нередко случаи реставрации архитектурных элементов, результаты которой эстетически или стилистически далеки от исходного образца. Такое может происходить в связи с низким уровнем квалификации реставратора. На рис. 1 приведены характерные примеры неудачных результатов реставрационной работы.



Рис. 1. Примеры неудачных результатов реставрационной работы

Современное развитие цифровых технологий позволяет существенно сократить общее время процесса реставрации и субъективное влияние человеческого фактора за счет применения трехмерного моделирования и последующего прототипирования элемента. В процессе ускоренной реставрации последовательно выполняются следующие этапы работы: 3D-сканирование объекта → восстановление или воссоздание утраченных элементов в САПР с получением готовой трехмерной модели → конвертирование (прототипирование) цифрового образа в твердотельные матрицы (дерево/пластик) → снятие оттисков в виде многоцветных форм → исследование химического состава образцов исторических материалов → разработка аутентичных рецептов материала → заливка форм → получение материализованных реплик реставрируемого элемента.

**Основная часть.** С целью прототипирования цифровых моделей в ПГУАС разработан обрабатывающий станок с компьютерным управлением основными режимами [1, 2]. Он способен выполнять обработку древесины и пластика, создавая материализованные копии цифровых моделей реставрируемого объекта (в виде барельефа) при их максимальном размере 350×350 мм. Конструкцию станка отличает использование недорогих материалов из профильного проката и фанеры, стабилизированной полимером (рис. 2). Для закрепления заготовки деревянного макета применяется крепежный стол с отверстиями. Продольное перемещение обеспечивается кареткой оригинальной конструкции с узлом демпфирования неровностей, движущейся по направляющим из уголка 32×4 мм. Привод выполнен в виде зубчатого ремня. Ограничение перемещения, а также задание машинных координат осуществляются за счет электромеханических концевых датчиков. Станок способен работать с файлами различных программных сред, таких, как ArtCam, Alphacam, SprutCAM, MasterCAM, PowerMill, SolidCAM и т.п.

Пример практической реализации цифрового подхода к воссозданию утраченных элементов декора показан на photographиях (рис. 3 и 4), сделанных в лабораториях ПГУАС.



Рис. 2. Станок для изготовления твердотельных моделей



Рис. 3. Процесс воссоздания объекта декора (слева направо): получение твердотельной модели; снятие оттиска в виде многократной силиконовой формы; готовая реплика исходного объекта, выполненная в бетоне

Высокую точность копий, полученных с исходных предметов по реализованной технологии, иллюстрируют фотографии крепежных элементов.

В ряде случаев на первый план реставрации выходит задача укрепления поверхности или кольматации видимых трещин на каменных элементах непосредственно на месте проведения работ [4]. Это вызвано запретом на их транспортировку, обусловленным риском их дополнительного разрушения. В этих обстоятельствах целесообразно применять технологию «самозалечивания» исходного материала способом биоцементации. Он апробирован фирмой Amonit (Франция) при реставрации памятников, расположенных на территории Франции. Продукт Biominéralisant Calcite после нанесения на поврежденную каменную поверхность способен осуществлять синтез биогенного карбоната кальция при периодическом воздействии инициатора процесса в виде нутриционного вещества [5...7].

В работе [7] нами показано, что использование биодобавки на основе микроорганизма вида *Bacillus cereus* в цементных растворах сопровождается ростом их прочности. При этом максимальный прирост прочности наблюдается в 3-суточном возрасте образцов – до 40...45 % (на сжатие) и до 13...15 % (на изгиб). В настоящее время исследуется возможность использования указанной добавки для кольматации пор и трещин на поверхности архитектурных элементов карбонатно-кальциевого состава (мрамор, известняк, цементка).

При проведении реставрационных работ актуальной остается задача оценки химического состава компонентов, использованных при постройке исторического объекта. Перечень вяжущих веществ, применявшихся в таких составах на протяжении



Рис. 4. Исходный объект и его реплика из высокофункционального бетона

нескольких веков, был достаточно ограничен и представлен известью, гипсом, глиной, цемянкой, а также их смесью с минеральными наполнителями. Это обстоятельство сужает круг возможных материалов и облегчает задачу идентификации составов исторических растворов и бетонов.

При проведении исследований оценивали химико-минералогический состав затвердевших растворов, изъятых с объектов культурного наследия регионального значения, расположенных в Республике Крым. Для определения состава фрагменты кернов помещали в разбавленный раствор HCl. После выдержки полученный раствор фильтровали и взвешивали остатки. Результаты исследований приведены на рис. 5.

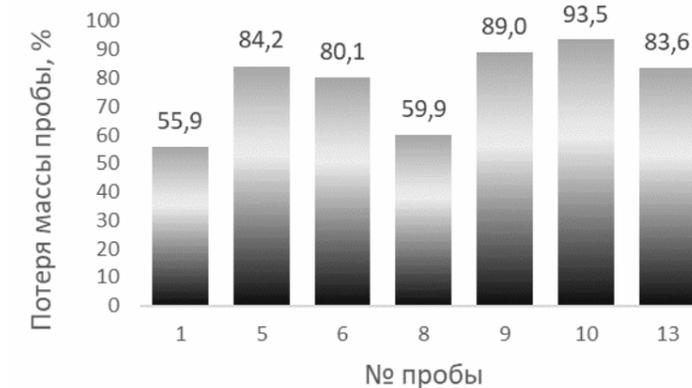
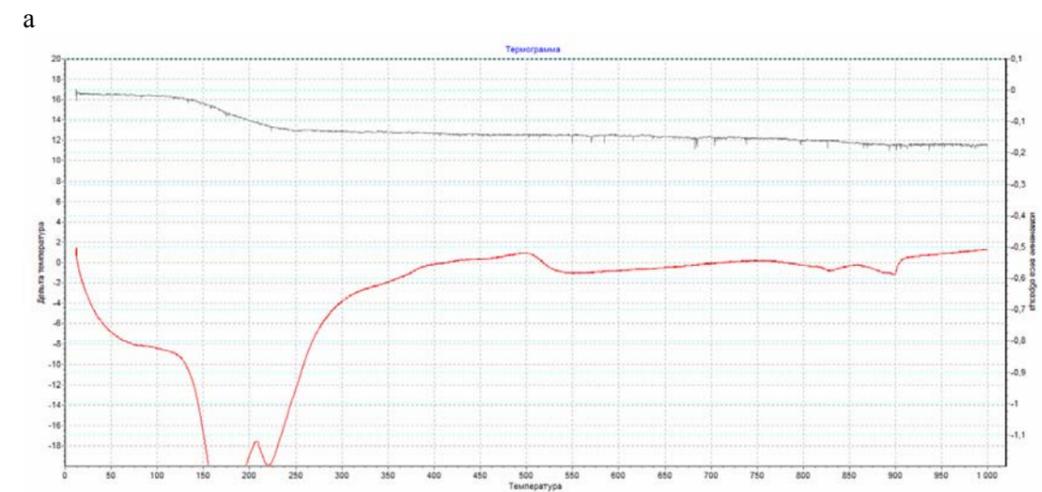


Рис. 5. Потеря массы образцов после экспозиции в растворе HCl

Анализ данных показывает, что содержание в образцах некарбонатных компонентов, определенных методом растворения, варьируется в пределах 6,5...44,1 %. На следующем этапе уточняли вид инертных компонентов строительных растворов методом петрографической разборки и минералогического анализа.

Для повышения точности оценки компонентного состава образцов были использованы методы дифференциально-термического и термогравиметрического анализов. С целью сравнительной идентификации на начальной стадии были сняты термограммы  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CaCO}_3$ . Результаты дифференциально-термического анализа, приведены на рис. 6 и 7.

Рис. 6. Термограмма эталона (начало):  
а –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

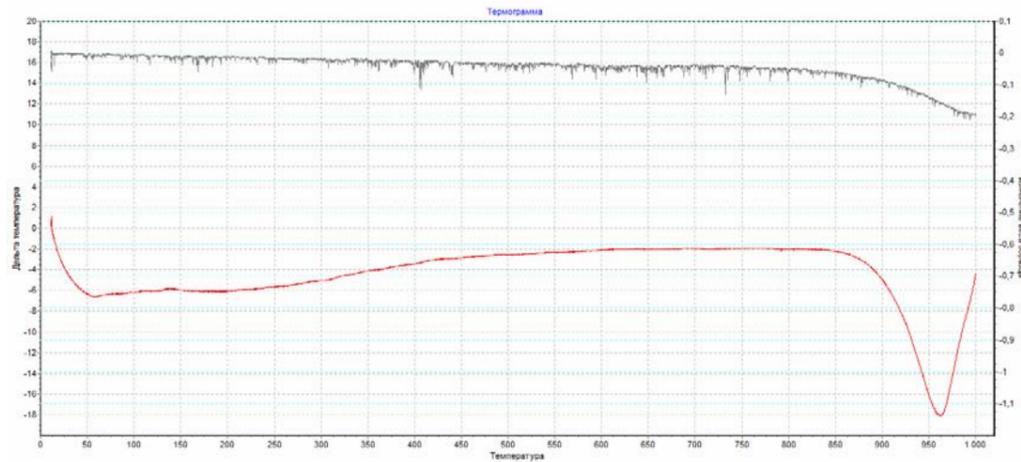
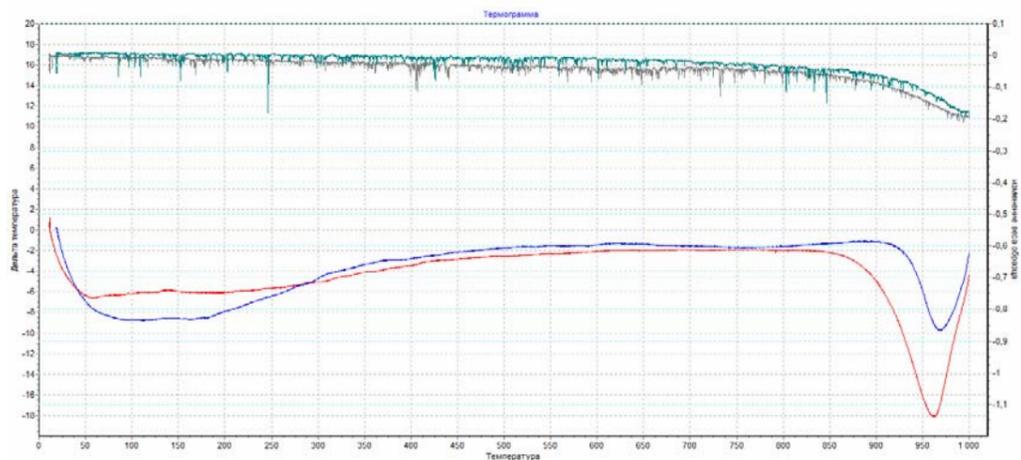


Рис. 6. Термограмма эталона (окончание):  
б –  $\text{CaCO}_3$

Анализ показывает, что основным минеральным компонентом образца №1 является кальцит. Это позволяет сделать вывод об использовании извести в качестве вяжущего при изготовлении исходного строительного раствора. В качестве минерального заполнителя в рассматриваемом составе присутствует также кварцевый песок с примесью глины, наличие которой подтверждено в результате петрографической разборки остатка, полученного после отмывки образца раствором соляной кислоты (см. рис. 7, б).

а



б



Рис. 7. Исследование состава исторического фрагмента:  
а – термограмма образца №1; б – остаток после отмывки (кварцевый песок с примесью глины)

### Выводы

Разрабатываемая технология позволяет сократить влияние человеческого фактора и получить результат реставрации максимально приближенный к исходному образцу как по внешнему виду, так и по аутентичности применяемых материалов.

Практическая апробация режимов работы фрезерного станка с цифровым управлением показала высокую точность копий, полученных путем сканирования оригинальных элементов и проектирования их трехмерных моделей в САПР.

Введение добавки экзометаболического микроорганизма штамма *Bacillus cereus* способствует увеличению прочности затвердевших цементных растворов, что свидетельствует о целесообразности их применения с целью восстановления поверхностных слоев исторических элементов.

Показано, что комбинация химического и дифференциально-термического анализов, а также метода петрографической разборки позволяет с достаточной точностью провести экспресс-оценку смешанных известковых и гипсовых растворов, использованных при строительстве архитектурно-исторических объектов.

### Список литературы

1. Береговой, В.А. Цифровые технологии в исследовании механических свойств тонкослойных материалов / В.А. Береговой, С.А. Болдырев, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 5–12.
2. 3D-принтер для печати строительной керамики / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 32–37.
3. Максимович, Н.Г. Биотехнологии в инженерной геологии / Н.Г. Максимович, В.Т. Хмурчик // Инженерная геология. – 2014. – №3. – С.18–25.
4. Rafat, S. The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete/ S. Rafat, Kaur S. Navnet // Construction and building materials. – 2011. – № 10. – P. 3791–3801.
5. Jonkers, H.M. The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete / H.M.Jonkers, A.Teissen, G.Muizer, O.Kopuroglu and E. Schlangen // Environmental Engineering. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.
6. Паола Лоренци. Новые технологии в обработке и сохранении камня памятников истории и культуры / Паола Лоренци // Международная научно-практическая конференция «Наследие, наука и технологии» / АУИПИК, СПбГУ, 2017. – URL: <http://auiipik.ru/wp-content/uploads/2017/12/Паола-Лоренци-Paola-Lorenzi-.pdf>
7. Береговой, В.А. Влияние добавки экзометаболического микроорганизма *Bacillus Cereus* на прочность цементных растворов / В.А. Береговой, С.А. Болдырев, А.Е. Капустин, А.М. Субботин, С.А. Петров // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2. – С. 6–16.

### References

1. Beregovoy, V.A. Digital technologies in the study of mechanical properties of thin-layer materials / V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, I.Yu. Lavrov // Regional architecture and engineering. – 2020 – No. 4. – P. 5–12.
2. 3D-printer for printing construction ceramics / V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov // Regional architecture and engineering. – 2020. – No. 1. – P. 32–37.
3. Maksimovich, N.G. Biotechnology in engineering geology / N.G. Maksimovich, V.T. Khmurchik // Engineering geology. – 2014. – N. 3. – P.18–25.
4. Rafat, S. The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete/ S. Rafat, Kaur S. Navnet // Construction and building materials. – 2011. – № 10. – P. 3791–3801.
5. Jonkers, H.M. The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete / H.M.Jonkers, A.Teissen, G.Muizer, O.Kopuroglu and E. Schlangen // Environmental Engineering. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 230–235.
6. Paola Lorenzi. New technologies in processing and preserving stone monuments of history and culture / Paola Lorenzi // International scientific and practical conference

«Heritage, science and technology» / AUIPIK, Saint Petersburg state University, 2017. – URL: <http://auiplik.ru/wp-content/uploads/2017/12/Paola-Lorenzi-Paola-Lorenzi.pdf>

7. Beregovoy, V.A. The effect of the addition of exometabolites of the bacterium *Bacillus Cereus* on the strength of cement mortars / V.A. Beregovoy, S.A. Boldyrev, A.E. Kapustin, A.M. Subbotin // Regional architecture and engineering. – 2020 – No. 2. – P. 6–16.

## Указатель статей, опубликованных в 2021 году

### Index of articles, published in 2021

1. **Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, Ефимов О.И., Замалиев Ф.С., Ласьков Н.Н.** Сцепление жёсткой арматуры и ячеистого бетона. – №4(49). – С.79–87.
2. **Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, Ефимов О.И., Замалиев Ф.С., Ласьков Н.Н.** Предпосылки и ограничения к нелинейному расчёту сталебетонных балок из ячеистого бетона с жёсткой арматурой из тонкостенных стальных гнутых профилей. – №4(49). – С.88–95.
3. **Аль-Хаснави Яссер Сами Гариб, Ефимов О.И., Замалиев Ф.С., Ласьков Н.Н.** К вопросу о проектировании балки из ячеистого бетона с жёсткой арматурой. – №3(48). – С.137–144.
4. **Андреев С.Ю., Ласьков Н.Н., Степанов С.В., Князев В.А.** Теоретический анализ возможности повышения эффективности флотационного удаления дисперсных загрязнений за счет использования технологических приемов тонкослойного отстаивания и увеличения гидравлической крупности образующихся флотокомплексов. – №1(46). – С.170–182.
5. **Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Андреев В.С.** Анализ процесса разделения воздуха на кислород и азот в высокоградиентном центробежном поле микроциклона. – №4(49). – С.119–127.
6. **Андреев С.Ю., Лебединский К.В., Андреев В.С.** Новая технология интенсификации процесса разделения газовых смесей в центробежном поле за счет уменьшения размеров центробежных аппаратов. – №3(48). – С.167–175.
7. **Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Ласьков Н.Н., Яхкинд М.И.** Математическое моделирование закономерностей всплывания пузырьков в динамических водовоздушных смесях, используемых в процессах флотационной очистки сточных вод. – №3(48). – С.176–185.
8. **Андреев С.Ю., Шенин А.И., Степанов С.В., Князев В.А.** Теоретическое обоснование интенсификации процесса напорной флотационной очистки сточных вод за счет повышения эффективности растворения воздуха в сатураторе. – №1(46). – С.160–169.
9. **Андреев С.Ю., Яхкинд М.И., Ласьков Н.Н., Князев В.А.** Теоретический анализ свойств динамической двухфазной дисперсионной системы «вода – воздух». – №4(49). – С.128–136.
10. **Арискин М.В., Мартышкин Д.О., Ванин И.В.** Напряженно-деформированное состояние соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах. – №4(49). – С.103–111.
11. **Бакушев С.В., Снежкина О.В.** Расчёт упругих стержневых элементов с касательными нагрузками. – №2(47). – С.50–57.
12. **Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Юрова В.С.** Природа минеральных наполнителей и подвижность бетонной смеси. – №4(49). – С.30–35.

13. **Береговой А.М.** Вопросы повышения тепловой защиты и энергоактивности малоэтажных зданий. – №1(46). – С.183–187.
14. **Береговой А.М.** Стены со свойствами энергоактивности и утилизации тепла помещений. – №4(49). – С.160–164.
15. **Береговой А.М., Береговой В.А.** Показатели микроклимата и воздухообмена в объемно-планировочной структуре многоэтажного жилого здания. – №2(47). – С.72–76.
16. **Береговой А.М., Береговой В.А., Снежкина О.В.** Теплоаккумулирующие конструкции и тепловой режим помещений. – №3(48). – С.186–189.
17. **Береговой В.А., Капустин А.Е.** Проектирование растворной части неавто-клавных ячеистых бетонов повышенной прочности. – №2(47). – С.16–21.
18. **Береговой В.А., Лавров И.Ю., Капустин А.Е.** Разработка технологии восстановления каменных элементов при реставрации архитектурно-строительных объектов. – №4(49). – С.165–171.
19. **Богомолова И.С., Дуцев М.В.** Понятие дизайн-мышления и его роль в архитектурном проектировании. – №1(46). – С.227–232.
20. **Будылина Е.А., Гарькина И.А.** Междисциплинарные исследования в конструировании сложных систем. – №3(48). – С.106–113.
21. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Из опыта синтеза сложных систем. – №4(49). – С.25–29.
22. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Концептуальные подходы к системному проектированию композиционных материалов. – №1(46). – С.41–45.
23. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Основы качественной и количественной оценки качества сложных систем иерархической структуры. – №1(46). – С.77–85.
24. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Системные исследования в материаловедении. – №4(49). – С.48–53.
25. **Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.** Сложные системы: параметрическая идентификация, мониторинг, управление. – №2(47). – С.133–137.
26. **Будылина Е.А., Данилов А.М., Фокин Г.А.** Инновационное проектирование, смена парадигм, технология производства строительных материалов. – №3(48). – С.97–105.
27. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Теплов И.Ю.** Пены, содержащие гидрофобизованные частицы, для очистки воды от углеводородной пленки. – №1(46). – С.46–53.
28. **Вилкова Н.Г., Мишина С.И., Шумкина А.А.** Влияние водородного показателя на устойчивость трехфазных пен. – №4(49). – С.143–150.
29. **Волков В.П., Гарькин И.Н.** Напряженно-деформированное состояние узла стыка сваи серии 1.011.1-10 «Сваи забивные железобетонные». – №3(48). – С.129–136.
30. **Гарькина И.А., Данилов А.М.** Аналитическое конструирование композитов: многообразие, структура модели, декомпозиция, критерии качества. – №2(47). – С.22–27.
31. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В.** Системный анализ в управлении свойствами материалов. – №3(48). – С.63–68.
32. **Городнов И.И., Шенн А.И., Монахов В.А.** Обзор работ по оптимальному и рациональному конструированию композитных балочных систем. – №1(46). – С.109–121.
33. **Грачева Ю.В., Тарасеева Н.И., Иванов Н.М.** Длительная водостойкость модифицированных геосинтетических вяжущих для дорожного строительства. – №1(46). – С.63–69.
34. **Гречишкин А.В., Жоголева О.А., Матвеева И.В.** Учет фактора шумности при реконструкции исторической застройки провинциальных городов. – №2(47). – С.145–150.
35. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Кошев А.Н., Малютин Т.В.** Очистка воды поверхностного источника с применением смесевых коагулянтов. – №1(46). – С.153–159.
36. **Гришин Б.М., Бикунова М.В., Ласьков Н.Н., Перельгин Ю.П.** Оценка технологических параметров вихревого смесительного устройства флотационной установки. – №2(47). – С.118–124.

37. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Разработка конструкций поперечника одноэтажного здания каркасного типа. – №1(46). – С.103–108.
38. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Сравнительный анализ вариантов колонн для многоэтажного каркасного жилого дома. – №3(48). – С.144–149.
39. **Гучкин И.С., Ласьков Н.Н.** Усиление железобетонной плиты перекрытия слоями армированного бетона. – №2(47). – С.67–71.
40. **Дерина М.А.** Концепция вариативного сравнения технико-экономического решения жилых и общественных зданий. – №2(47). – С.102–108.
41. **Дерина М.А., Петрянина Л.Н.** Концепция формирования архитектурно-планировочных закономерностей городских общественных многофункциональных центров. – №1(46). – С.220–226.
42. **Еремкин А.И.** Вклад журнала «Региональная архитектура и строительство» и ученых Пензенского государственного университета архитектуры и строительства в развитие строительной отрасли Пензенской области. – №4(49). – С.151–159.
43. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К.** Анализ теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию актуальности определения вредностей от сгорания свечей и воздухообмена для их ассимиляции в православных культовых сооружениях. – №4(49). – С.137–142.
44. **Еремкин А.И., Аверкин А.Г., Пономарева И.К., Леонтьев В.А., Петрова К.А.** Теоретические основы и рекомендации по созданию местной вытяжной вентиляции продуктов сгорания свечей в зале богослужения. – №1(46). – С.195–202.
45. **Ерёмкин А.И., Баканова С.В., Белов В.Е., Родионов Ю.В.** Некоторые методы энергосбережения в системах отопления жилых многоквартирных зданий. – №2(47). – С.138–144.
46. **Еремкин А.И., Ежов Е.Г., Леонтьев В.А.** Методика исследования надежности и энергетической эффективности систем теплоснабжения. – №2(47). – С.109–117.
47. **Еремкин А.И., Пономарева И.К., Петрова К.А.** Исследование влияния конвективных потоков от отопительных приборов на климатические условия и сохранность убранства в залах богослужения церквей, храмов, соборов. – №3(48). – С.150–157.
48. **Жегера К.В., Самигулина Е.А.** Процесс системы менеджмента качества «корректирующие и предупреждающие действия» на примере строительного предприятия. – №2(47). – С.44–49.
49. **Зайцева М.В.** Управление качеством процессов создания отделочных покрытий цементных бетонов. – №3(48). – С.78–81.
50. **Ибрагимов Р.А., Королев Е.В.** Применение магнитных диспергаторов для обработки минеральных компонентов строительных материалов (обзор). – №1(46). – С.5–19.
51. **Каракова Т.В., Данилова А.В.** Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы. – №1(46). – С.211–219.
52. **Комаров В.А., Болдырева О.В., Трегуб А.Ю.** Напряженно-деформированное состояние консольных опор балок с подрезкой. – №1(46). – С.95–102.
53. **Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А.** Эффективность комплексной минеральной добавки в мелкозернистом самоуплотняющемся бетоне. – №3(48). – С.114–122.
54. **Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М.** Композиционные материалы как полидисперсные системы. эффективные модели. – №3(48). – С.16–25.
55. **Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М., Данилов А.М.** BIG DATA и параметры структуры материалов. – №3(48). – С.5–15.
56. **Королева Т.И., Щербакова В.В., Каледя И.А.** Технико-экономическая эффективность водохозяйственных систем населенных мест. – №1(46). – С.203–210.
57. **Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитина О.В.** К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов. – №1(46). – С.20–27.

58. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Известковые составы для реставрации и отделки стен зданий. – №4(49). – С.36–41.
59. **Логанина В.И., Зайцева М.В.** Структурообразование известковых композиций с добавкой полисиликатного раствора. – №4(49). – С.42–47.
60. **Логанина В.И., Куимова Е.И., Зайцева М.В.** Оценка достоверности контроля производства сухих строительных смесей. – №1(46). – С.54–62.
61. **Логанина В.И., Куимова Е.И., Зайцева М.В., Галкина Д.К.** Оценка качества сухих строительных смесей с учетом вариабельности сырья. – №3(48). – С.74–77.
62. **Логанина В.И., Учасва Т.В., Зайцева М.В.** Оценка затрат на повышение качества при производстве сухих строительных смесей. – №3(48). – С.69–73.
63. **Логанина В.И., Фролов М.В.** Исследование влияния характеристик наружных отделочных слоев на влажностный режим в стенах зданий. – №2(47). – С.36–43.
64. **Логанина В.И., Фролов М.В.** Оценка влияния паропроницаемости фасадных красок на изменение влажностного режима в наружных стенах. – №1(46). – С.70–76.
65. **Лунегова А.А., Болотин А.В., Вдовин В.И.** Перспективы использования лего-кирпича в индивидуальном жилищном строительстве. – №3(48). – С.26–31.
66. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Баукова Н.С.** Оценка зрелости процесса «Управление средствами измерений», реализуемого при изготовлении металлических конструкций для нефтегазовой, металлургической и нефтехимической отраслей. – №2(47). – С.82–93.
67. **Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Баукова Н.С.** Оценка эффективности внедрения системы бережливого производства металлических конструкций для нефтегазовой, металлургической и нефтехимической отраслей промышленности. – №1(46). – С.144–152.
68. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Оптимизация структуры и прогнозирование конструкционной прочности бетонов нового поколения. – №4(49). – С.13–24.
69. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Состав, структура и свойства кристаллической фазы керамзитового заполнителя. – №3(48). – С.53–62.
70. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Структура и свойства аморфной фазы пористых заполнителей. – №1(46). – С.35–40.
71. **Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И.** Регрессионные взаимосвязи между параметрами качества структуры и конструкционной прочности цементного камня. – №1(46). – С.28–34.
72. **Максимова И.Н., Ерофеева И.В., Афонин В.В., Емельянов Д.В., Ахмедов А.М., Матьякубов Х.Б.** Статистическая оценка качества цементных композитов. – №3(48). – С.45–52.
73. **Миряев Б.В., Зотов В.С.** Напряженно-деформированное состояние узлов деревянного купола. – №4(49). – С.112–118.
74. **Монахов В.А., Зайцев М.Б.** Определение напряженно-деформированного состояния стержневой системы на основе принципа двойственности. – №4(49). – С.96–102.
75. **Монтаев С.А., Досов К.Ж., Адилова Н.Б., Таудаева А.А.** Исследование сырьевых композиций для получения керамического заполнителя и пористой теплоизоляционно-конструкционной стеновой керамики. – №4(49). – С.54–62.
76. **Монтаев С.А., Таудаева А.А., Жарылгапов С.М.** Влияние температуры обжига на изменения физико-механических свойств стеновой керамики на основе кремнистой породы-опоки. – №4(49). – С.63–70.
77. **Наумов В.А.** Влияние частоты вращения колеса канализационного погружного насоса на параметры рабочей точки. – №2(47). – С.125–132.
78. **Нежданов К.К., Артюшин Д.В., Пигина А.С.** Новый способ армирования железобетонных конструкций. – №1(46). – С.138–143.
79. **Низина Т.А., Володин В.В., Балыков А.С., Коровкин Д.И.** Оценка кинетики твердения цементного камня, модифицированного добавками термоактивированной глины и карбонатных пород. – №1(46). – С.86–94.
80. **Очкина Н.А.** Влияние рецептурных факторов на деформативные свойства высокоплотных композитов. – №4(49). – С.71–78.

81. **Саденко Д.С., Гарькин И.Н.** Внутренние дефекты в бетонных конструкциях: диагностика и методика устранения. – №2(47). – С.77–81.
82. **Селютина Л.Ф.** Испытания усовершенствованной железобетонной плиты покрытия. – №1(46). – С.130–137.
83. **Селяев В.П., Безрукова Е.С., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р.** Вероятностная оценка долговечности железобетонных конструкций методом статистической линеаризации деградационных функций. – №2(47). – С.58–66.
84. **Селяев В.П., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р.** Нелинейные модели деградации полимерных композитов, работающих в агрессивных средах. – №2(47). – С.5–15.
85. **Снежкина О.В.** Трещиностойкость железобетонных балок с малым и средним пролетом среза. – №3(48). – С.123–128.
86. **Снежкина О.В., Корнюхин А.В.** Сравнение методов расчета прочности железобетонных балок на действие поперечных сил. – №2(47). – С.94–101.
87. **Тараканов О.В., Белякова Е.А., Кагина А.А.** Перспективы применения карбонатных пород в бетонах нового поколения. – №3(48). – С.87–96.
88. **Тацки Л.Н., Ильина Л.В., Шоева Т.Е.** Вещественный состав и технологические свойства глинистого сырья для производства кирпича в Западной Сибири. – №3(48). – С.32–44.
89. **Усачев А. П., Рулев А.В., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Соловьев В.А.** Совершенствование контроля перепада давления на плоских фильтрующих элементах грубой и тонкой очистки, размещенных в одном корпусе газовой двухступенчатой установки. – №1(46). – С.188–194.
90. **Усачев А.П., Шурайц А.Л., Хомутов А.О., Пикалов А.А.** Газодинамическая и тепловая эффективность при размещении фильтрующих элементов грубой и тонкой газовой очистки в одном корпусе. – №3(48). – С.158–166.
91. **Учасва Т.В., Логанина В.И.** Оценка риск-менеджмента процесса окрашивания строительных изделий и конструкций. – №2(47). – С.29–35.
92. **Черкасов В.Д., Тюрин М.В.** Влияние эпоксидной смолы на демпфирующие свойства материала на основе ПВА. – №3(48). – С.82–86.
93. **Чуманов А.В., Шейн А.И., Монахов В.А.** Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов. – №1(46). – С.122–129.
94. **Шевляков В.Ф., Руденко О.В., Анохина Т.Г., Аноп Д.К.** Расчётные характеристики стеклопластиковых профилей, изготавливаемых методом пултрузии ТОО «ВК-Спецматериалы», с учётом результатов испытаний. – №4(49). – С.6–12.